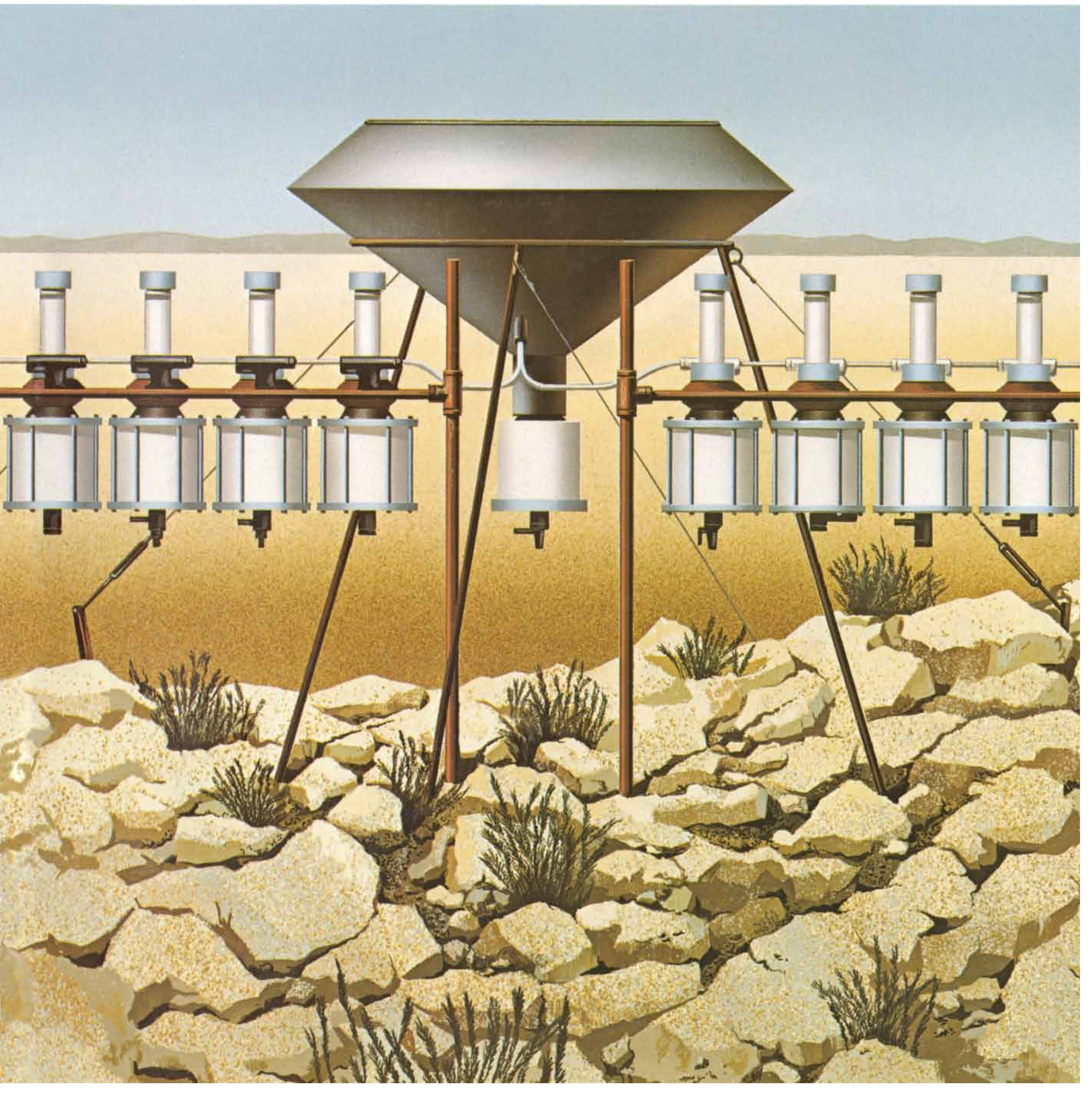
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



PALEOAGUA EN SINAI-NEGEV

Septiembre 1985
400 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 108
Septiembre 1985

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

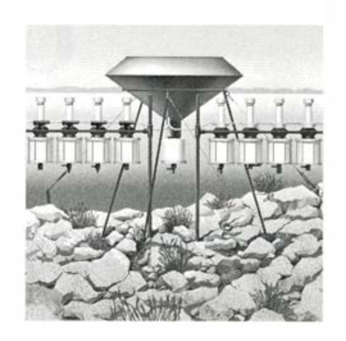
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Los satélites de Urano, Neptuno y Plutón*; Luis Bou: *Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo* y *Juegos de ordenador*; Carlos López-Fanjul de Argüelles: *La evolución del darwinismo*; Santiago Torres Martínez: *Reconocimiento quimiosensorial de la individualidad genética*; Antonio Blanco Freijeiro: *Los palacios minoicos*; Montserrat Domingo Morató: *Agua fósil bajo la península de Sinaí-Negev*; Ginés López: *Las asclepias y sus visitantes*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Alberto Dou, José Luis Comellas, Juan Gallardo, Eusebio Bernabeu y Luis Alonso



LA PORTADA

La portada ilustra un aparato colector de muestras de agua apuntalado en un desierto de la península del Sinaí-Negev. Las condiciones áridas de la superficie contradicen la geología subterránea: vastas cantidades de agua fósil llenan los poros de una capa de arenisca que se extiende bajo la península. Agua de lluvia recogida por el muestreador aportó pruebas relativas a la historia del depósito subterráneo (véase "Agua fósil bajo la península de Sinaí-Negev", de Arie Issar, en este mismo número). El colector se diseñó para proteger las muestras de agua de la evaporación y contaminación en el duro ambiente del desierto. El embudo recoge agua de lluvia y la conduce a la hilera horizontal de recipientes subyacentes. Un dispositivo magnético sella herméticamente cada recipiente una vez que éste se llena, y el flujo adicional se desvía al siguiente.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 4400 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente
9	M. Elices Calafat
10-15	Juan Cotoner y M. Elices
16	M. Elices Calafat
19	Laboratorio de Propulsión a Chorro, Instituto de Tecnología de California
20-22	Ian Worpole
23	Christian Veillet, Centro de Estudios e Investigaciones Geodinámicas y Astronómicas
24-25	Ian Worpole
26	Observatorio Naval de los Estados Unidos
27-28	Ian Worpole
31	Quesada/Burke (*arriba*), International Business Machines Corporation (*abajo*)
32-38	Andrew Christie
43	Museo Británico
44-53	Patricia J. Wynne
55	James Kilkelly
56-59	Ilil Arbel
60	James Kilkelly
63	J. Wilson Myers, Eleanor Emlen Myers y Gerald Cadogan
64	Andrew Tomko
65	Raymond V. Schoder, S.J., Universidad de Loyola
66	J. Wilson Myers, Eleanor Emlen Myers y Gerald Cadogan
68	Alan D. Iselin
69-70	Andrew Tomko
73	Earth Survey Corporation
74	Andrew Tomko
75	Arie Issar, Instituto Jacob Blaustein de Investigación del Desierto
76-78	Andrew Tomko
81	Lynn M. Stone, Earth Scenes
82-84	Enid Kotschnig
85	Lynn M. Stone, Animals, Animals
86-87	Ilil Arbel
90	The Learning Company
91-93	Ilil Arbel
94	Worth Booth
95-98	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

MANUEL ELICES CALAFAT ("Depósitos criogénicos de hormigón pretensado") es catedrático de la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid y director del departamento de física y física de materiales. Desde 1964 trabaja en problemas relacionados con el hormigón pretensado, corrosión de armaduras, fractura del hormigón, fenómenos viscoplásticos y comportamiento a muy bajas temperaturas. En 1981, la Asociación Técnica Española del Pretensado le otorgó su medalla por la colaboración al desarrollo del hormigón pretensado. En la actualidad preside y coordina las actividades del grupo de trabajo relacionado con las aplicaciones criogénicas del hormigón pretensado en el seno de la Federación Internacional del Pretensado.

ROBERT HAMILTON BROWN y DALE P. CRUIKSHANK ("Los satélites de Urano, Neptuno y Plutón") son astrónomos planetarios. Brown está adscrito al Laboratorio de Propulsión a Chorro, del Instituto de Tecnología de California. Estudió en las universidades de Purdue y de Hawai en Manoa, recibiéndose de doctor en 1982. Se incorporó entonces, en calidad de ayudante de investigación en ciencias planetarias, al Instituto Hawaiano de Geofísica, donde realizó estudios telescópicos de satélites del sistema solar externo. A principios de este año, Brown volvió al Laboratorio de Propulsión a Chorro, para formar parte del Grupo Científico de Imágenes del Voyager, que prepara el encuentro del *Voyager 2* con Urano. Cruikshank se formó en la Universidad del estado de Iowa y en la de Arizona; esta última le otorgó el doctorado en astronomía en 1968. Dos años después ingresó en el Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawai.

CHARLES H. BENNETT y ROLF LANDAUER ("Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo") son, respectivamente, investigador titular y becario del Centro de Investigación Thomas J. Watson que la IBM tiene en Yorktown Heights, Nueva York. Bennett cursó sus estudios en las universidades de Brandeis y Harvard, donde se doctoró en quimicofísica en 1970. Pasó dos años en el Argonne National Laboratory antes de ingresar en IBM, en 1972. La cuestión que perdurablemente ha atraído sus esfuerzos como investigador ha sido la teoría matemática de la aleatoriedad y la relación entre la mecánica estadística y la teoría de computación. En la actualidad, Bennett se encuentra en licencia sabática, concedida por IBM, para enseñar ciencias de cómputo en la Universidad de Boston. Landauer se licenció en ciencias en 1945, y se recibió de doctor en 1950, por Harvard. En 1952, tras un período en la NACA (precursora de la NASA), ingresó en IBM, participando en las primeras investigaciones sobre semiconductores.

G. LEDYARD STEBBINS y FRANCISCO J. AYALA ("La evolución del darwinismo") son genetistas de la Universidad de California en Davis, de la que Stebbins es profesor honorario y Ayala catedrático. Tras doctorarse por Harvard, en 1931, Stebbins enseñó en la Universidad de Colgate y, más tarde, en la de California en Berkeley. En 1950 se trasladó a Davis, donde fundó el departamento de genética. Stebbins ha descubierto cinco especies vegetales en California, tres de las cuales recibieron su nombre. Ayala, español de nacimiento, estudió en la Universidad de Columbia, donde obtuvo el doctorado en 1964. En 1971, después de haber enseñado en el Providence College y en la Universidad Rockefeller, se trasladó a Davis. Desempeña en ese centro actividades docentes e investigadoras.

GARY K. BEAUCHAMP, KUNIO YAMAZAKI y EDWARD A. BOYSE ("Reconocimiento quimiosensorial de la individualidad genética") trabajan en el campo de la inmunogenética de la identificación. Beauchamp y Yamazaki pertenecen al Centro de Estudios Quimiosensoriales Monell (MCSC) de la Universidad de Pennsylvania; Boyse, al Instituto Sloan-Kettering para la Investigación del Cáncer. Beauchamp se educó en el Carleton College y en la Universidad de Chicago, que le otorgó el doctorado en biopsicología en 1971. Ese mismo año ocupó una plaza en el MCSC. También enseña en la Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad de Pennsylvania. Yamazaki se doctoró en biología por la Universidad de Tokio en 1970. En 1974 se trasladó al Sloan-Kettering en calidad de investigador visitante, donde trabajó con Boyse y Lewis Thomas en inmunogenética de la autoidentificación. Desde 1980, Yamazaki trabaja en el MCSC. Boyse cursó la carrera de medicina en la Universidad de Londres. En 1957, decidió dedicarse por completo a la investigación, tras ocupar varias plazas hospitalarias en medicina clínica, patología y microbiología. Realizó investigaciones en inmunogenética, en Londres, hasta 1960, trasladándose posteriormente a la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York. En 1962, consiguió un puesto en el Sloan-Kettering, plaza que comparte con sus clases en la Universidad de Cornell.

PETER M. WARREN ("Los palacios minoicos") enseña historia antigua y arqueología clásica en la Universidad de Bristol. Tras doctorarse en arqueología minoica por la Universidad de Cambridge, desempeñó cargos docentes en las universidades de Cambridge y Durham, Escuela Británica de Atenas y Universidad de Birmingham. En 1977 accedió a su cargo actual en Bristol. Ha dirigido las excavaciones que descubrieron una aldea de la primera Edad de Bronce en Myrtos, en el sur de Creta; ha supervisado otras excavaciones en Debla y en Knossós.

ARIE ISSAR ("Agua fósil bajo la península de Sinaí-Negev") da clases de geología en la Universidad Ben-Gurion del Negev y es miembro de su Instituto de Investigación del Desierto. Tras licenciarse en geología por la Universidad Hebrea de Jerusalén, se incorporó a la división hidrogeológica del Servicio Geológico de Israel. Tomó parte en un proyecto de prospección de agua en el desierto de Negev, regresando luego a la Universidad Hebrea para completar su trabajo de doctorado, grado que recibió en 1961. En 1974, Issar participó en la fundación del Instituto de Investigación del Desierto.

DOUGLASS H. MORSE ("La asclepias y sus visitantes") es profesor de biología y director del programa de licenciatura de ecología y biología evolutiva de la Universidad de Brown. Estudió biología en el Bates College, Universidad de Michigan y Universidad estatal de Luisiana, por la que se doctoró en 1965. Dictó cursos en el departamento de zoología de la Universidad de Maryland en College Park y trabajó sobre ecología de los alimentos de las aves antes de trasladarse a la Universidad de Brown, en 1979.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cien años

Murió Juan Bautista Peset y Vidal, víctima de la epidemia colérica que sufrió Valencia en 1885, generalmente recordada por la vacunación Ferrán y por la polémica que ésta motivó.

Peset y Vidal nació en la misma Valencia en 1821 y era hijo de Mariano Peset de la Raga, destacada figura de la medicina valenciana de comienzos del pasado siglo. Fue padre, a su vez, de Vicente Peset Cervera, importante seguidor de la nueva "medicina de laboratorio" y uno de los principales introductores de la farmacología experimental en España. La actividad científica de Peset y Vidal se inició en 1840 con unas "proposiciones" para obtener el grado de bachiller en medicina por la Universidad de Valencia, en las que resulta patente la influencia de la "médecine physiologique" de Broussais. La acabó propugnando el estudio de la microbiología, la histopatología y la patología química, y defendiendo la vacunación Ferrán en la misma epidemia que ocasionó su muerte. Entre ambas fechas desarrolló una intensa labor como figura central de la clínica, la epidemiología y las instituciones médicas valencianas, publicando más de un centenar de trabajos científicos, además de redactar numerosos informes y memorias que quedaron manuscritas.

Durante su juventud, Peset y Vidal ejerció varios años en las localidades de Motilla y Alcántara, hasta que en 1862 se asentó definitivamente en Valencia. Allí consiguió un extraordinario prestigio como clínico. Durante casi un cuarto de siglo su consulta privada fue la más importante de la ciudad y, desde 1869 a 1875, se encargó en la Facultad de Medicina de la enseñanza de la clínica médica. El marco principal de su actividad científica fue, no obstante, el Instituto Médico Valenciano, asociación profesional fundada en 1841, que llegó a ser una de las instituciones médicas de mayor relieve en la España de las décadas centrales del siglo XIX.

Peset y Vidal fue fundamentalmente un médico práctico. La mayor parte de su obra estuvo dedicada a cuestiones relacionadas con la medicina interna o con problemas sanitarios y epidemiológicos. Fue un convencido seguidor de la mentalidad anatomoclínica que, durante la mayor parte de su vida, desconfió del "abuso exagerado" del método estadístico o de la aplicación de la investigación de laboratorio a la práctica médica. No obstante, supo rendirse ante la evidencia, abandonando, por ejemplo, la teoría miasmática del contagio y superando sus prejuicios frente a la micrografía. A partir de 1877, asimiló los resultados de la parasitología y, con motivo de la epidemia colérica de 1885, en la que, como hemos dicho, encontró la muerte, aceptó los de la nueva bacteriología.

Publicó más de medio centenar de artículos, entre los que destacan los consagrados a la tuberculosis pulmonar, a diferentes transtornos digestivos y al cólera. Se ocupó también de la fiebre amarilla, la lepra, la triquinosis y varios temas sanitarios o epidemiológicos de carácter general. Su libro más notable fue el titulado *Topografía médica de Valencia y su zona* (1878), quizá la última contribución española de altura de este género inspirado en la tradición del ambientalismo hipocrático. Peset y Vidal se inscribió explícitamente en dicha tradición, pero desde una postura crítica: "El objeto de la topografía médica es el estudio detenido de cuantas circunstancias especiales contribuyen directa o indirectamente al desarrollo de los afectos propios de un país, que modifican visiblemente su curso y terminación, que influyen en su frecuente o rara presentación y mayor o menor gravedad, e intervienen en la profilaxis y tratamiento de los mismos. Un profundo filósofo y médico consumado de la antigüedad, el grande Hipócrates, echó sus bases en preciosas e imperecederas obras, legándonos reglas las más constantes y sensatas, que no dudaron seguir los mejores prácticos de todos los siglos y países del mundo. En su teoría del influjo de los

734

FALLECIMIENTOS *en Valencia durante el quinquenio de 1856 al 1860.—Enfermedades á que fallecieron segun respectiva filiacion.*

Enfermedades á que fallecieron.	AÑOS 1856.	1857.	1858.	1859.	1860.	TOTAL
Calenturas (sin espresar género).	670	606	477	104	348	2205
Calentura inflamatoria.	1	»	»	»	3	4
Calentura catarrral y grippe.	»	»	5	1	6	12
Calentura gástrica. . .	4	1	3	6	5	19
Calentura tifoidea y tifus.	11	9	30	13	42	105
Calentura nerviosa y atáxica.	2	3	5	3	10	23
Calentura intermitente terciana.	17	7	10	5	6	45
Calentura intermitente cuartana.	1	2	2	»	1	6
Indigestion é infartos gástrico y bilioso. .	5	1	2	4	5	17
Viruelas.	133	16	4	3	7	163
Sarampion.	54	15	25	126	25	245
Escarlatina.	7	6	4	11	9	37
Erisipela.	4	3	4	1	6	18
Miliar.	»	1	»	»	»	1
Herpes.	2	2	5	2	6	17
Reumatismo y fiebre reumática.	8	13	11	6	7	45
Parto y sobreparto ó puerperio.	20	19	19	17	13	88
Anginas.	3	9	6	5	21	44
Croup ó garrotillo. . .	8	9	7	4	8	36
Inflamaciones (sin espresar género). . .	424	491	501	465	406	2287
Suma y sigue.	1374	1213	1120	776	934	5417

1. *Página inicial de una de las numerosas tablas estadísticas que incluye la* Topografía médica de Valencia y su zona *(1878), de Juan Bautista Peset y Vidal.*

climas, desarrollada con sagaz talento en el libro intitulado *del aire, de las aguas y de los lugares,* compendió cuanto se refiere a la topografía; y en efecto, por su carácter permanente debe ser tanto más poderoso, cuanto que existe siempre y se deja sentir sin cesar. La observación constante nos demuestra la influencia que alcanzan los climas sobre el hombre, para la cual no halló límites el Padre de la medicina, admitiendo que no sólo modifica notablemente su organismo, sino también sus facultades psíquicas.

"En los últimos siglos se ha recomendado excesivamente la importancia del estudio topográfico-médico, concediéndole una preponderancia sin límites, cuya exageración sería pecado muy leve, comparado con la grave falta de abandonarle por completo. No obstante ser un hecho verdadero el predominio de ciertas enfermedades en determinados países, no se crea que la topografía médica absorbe la parte principal de la ciencia, y que cada localidad presenta un grupo especial de afectos, careciendo de los demás; puesto que pueden desarrollarse todos ellos, aunque algunos con mayor frecuencia y más intensidad, y también ofrecer modificaciones que les diferencien de los otros. El influjo del clima se extiende a generalizar en las regiones meridionales las enfermedades, que se padecen raras veces en las septentrionales; pero siempre que en éstas se desarrolle alguna de aquellas no se desviará la naturaleza del orden de sus leyes, pues como dice Ruiz de Luzuriaga, se cura con los mismos métodos bien fundados *mutatis mutandis,* cuyas ideas desenvolvió admirablemente Cornelio Celso en el principio del libro segundo de sus obras médicas. El célebre práctico Baglivio se excedió de la verdad al asegurar, que los métodos terapéuticos cambian según el país y que el clima varía la naturaleza de las enfermedades, cuando los unos y la otra sólo sufren modificaciones...

"Tampoco influye la localidad, al parecer, de un modo notorio sobre las bases del pronóstico de las enfermedades, puesto que en cualquier país corresponden los resultados a las reglas que prescribe la ciencia de observación. Así nos lo manifestó ya Hipócrates al final de su *Libro de los pronósticos,* asegurando que estos siempre suceden no obstante las diversas estaciones y constitución médica del año, apareciendo constantemente verdaderos en todas las comarcas, aun las más distintas, a cuyo objeto aduce las más opuestas del globo, que en su tiempo se conocían. Es preciso, dice, tener un conocimiento profundo de los signos y los demás síntomas, y no ignorar, que en todos los años y en todas las estaciones los malos signos anuncian el mal y los buenos el bien. Los que dejó enumerados tienen lugar en la Libia, en Delos y en la Escitia; por consiguiente, la conclusión sacada de los signos en unas mismas comarcas será con más frecuencia verdadera que falsa, si por el estudio se aprende a apreciarlos y a calcular su valor. Efectivamente, localidades tan encontradas como una región ardiente de Africa, otra templada del Archipiélago griego en Asia, y otra fría del Norte de Europa, no invalidan el verdadero valor de los pronósticos sacados de los signos de las enfermedades si se verifica bien su apreciación.

"Estas consideraciones tan prudentes como ciertas no afectan... la importancia de los estudios topográfico-médicos, puesto que si una localidad no llega a cambiar la naturaleza morbífica ni las bases de un buen pronóstico, aun así infiere modificaciones atendibles, contribuyendo a precipitar el curso de las enfermedades y a agravarlas, o al contrario en los casos favorables. En cada clima y hasta en localidades circunscritas existe a las veces una particular constitución, debida a su temperatura y demás fenómenos atmosféricos y meteorológicos, a los alimentos, bebidas, costumbres políticas y religiosas y condiciones orgánicas de sus habitantes. Todas estas circunstancias son causas poderosas y permanentes para el desarrollo de algunas enfermedades, predisponen preferentemente a padecerlas e inducen cambios notables en los síntomas, curso y complicaciones; siendo todo esto un elemento más, que debe el médico saber apreciar oportunamente, si quiere que su terapéutica sea acertada. Así es, que se observan

MEMORIA

BIOGRÁFICA, BIBLIOGRÁFICA Ó CRÍTICA

ACERCA DE

D. ANDRÉS PIQUER,

ESCRITA PARA EL CONCURSO DE PREMIOS DE 1869
DE LA REAL ACADEMIA DE MEDICINA DE MADRID, QUE ADJUDICÓ
EL PRIMERO DE LOS OFRECIDOS

A SU AUTOR EL

DR. D. JUAN BAUTISTA PESET Y VIDAL,

SOCIO FUNDADOR DEL INSTITUTO MÉDICO VALENCIANO,
Y LAUREADO CON TODOS SUS PREMIOS,
DE MÉRITO Y CORRESPONSAL DE OTRAS CORPORACIONES POR CONCURSO.

IMPRESO
POR ACUERDO DEL INSTITUTO MÉDICO VALENCIANO.



VALENCIA,
IMPRENTA DE FERRER DE ORGA,
A ESPALDAS DEL TEATRO PRINCIPAL.

1878.

2. *Portada del libro de Juan Bautista Peset y Vidal sobre Andrés Piquer, uno de sus mejores estudios historicomédicos.*

/ Peset y Vidal dijo: Que en la última sesión del 20 manifes-
taron los jóvenes consocios vivos deseos de que los prácticos y expe-
rimentados espusiesen el tratamiento del cólera morbo asiático
entablado en las diferentes invasiones, y que siendo el único
viejo de los asistentes ofreció exhibir sus escasos conocimien-
tos, adquiridos por el estudio y observación de las mismas; lo
que iba á cumplir ciñéndose como médico puramente prác-
tico á este terreno tan árido como escabroso, sin permitir-
se excursiones al campo de las teorías y concretándose solo á su
conducta facultativa á la cabecera del enfermo en dichas in-
vasiones en hospitales de coléricos, en establecimientos públi-
cos y en su clientela particular, que fué la misma ó muy
parecida á la que siguieron sus compañeros. Reseñó breve-
mente las cuatro epidemias de esta Capital, la de 1834 de la
que se desentendió por hallarse en aquella época al principio de
su carrera, las de 1854 y 55, 1859 y 1860, que las consideró
evoluciones de un mismo proceso epidémico y la de 1865, que
la sumieron en un largo período de aflicción por haber dura-
do cada una lo menos tres meses, estacionándose la primera
y última cerca de medio año, y arrebatándole todas ellas 14031
víctimas según datos oficiales, que según otros de bastante
crédito se elevan á mayor número. Dió por sabido el ori-
gen del cólera asiático de la desembocadura del Ganges, donde
existió siempre en forma endémica, aunque adquiriendo

3. Página de un manuscrito de Juan Bautista Peset y Vidal, en el que resumió una de sus últimas conferencias en el Instituto Médico Valenciano. El tema es la epidemia colérica de 1885, víctima de la cual falleció poco después.

comúnmente las afecciones agudas en los países secos y elevados, mientras por el contrario reinan las crónicas en los que por su situación son bajos, húmedos y mal ventilados: en éstos se presentan con frecuencia las neurosis, las escrófulas, la raquitis, la tisis pulmonar y los reumatismos, especialmente crónicos, cuyas enfermedades son más raras en los primeros, y en los climas cálidos dominan la calentura amarilla, la disentería y el tétanos con otros muchos afectos casi desconocidos en los septentrionales, en donde se desenvuelven con facilidad los inflamatorios, observándose en los climas templados mayor variedad en las enfermedades."

La psiquiatría y la historia de la medicina fueron otros dos campos en los que Peset y Vidal desarrolló su actividad. En 1853 fue durante dos meses director del departamento de enajenados del Hospital General de Valencia y, dos décadas más tarde, organizó un curso de clínica psiquiátrica entre sus alumnos de la Facultad de Medicina. Dedicó algunos trabajos a las enfermedades mentales, pero dejó manuscrita su más importante obra sobre el tema, titulada *Patología psicológica* (1859). Más numerosos fueron sus estudios sobre historia de la medicina, disciplina que el clínico valenciano cultivó con una rigurosidad excepcional en la España de su tiempo. Aparte de un *Bosquejo de la Historia de la Medicina en Valencia* (1863-66), sobresalen a ese respecto las monografías que dedicó a Andrés Piquer (1878) y Luis Collado (1878).

Depósitos criogénicos de hormigón pretensado

Las propiedades excepcionales del hormigón pretensado a temperaturas criogénicas lo hacen muy adecuado en la construcción de depósitos para almacenar gas natural y otros gases peligrosos por su inflamabilidad o toxicidad

Manuel Elices Calafat

Durante la segunda semana de noviembre de 1980, la nave espacial *Voyager 1* se acercó a unas rocas que flotan en el espacio, llamadas Mimas, Tetis, Dione y Rea y descubrió que eran unas enormes masas heladas. Nueve meses después, la nave *Voyager 2* se aproximaba a Encédalo, Iapetus e Hyperión. Todos estos mundos helados, con temperaturas inferiores a 170 grados bajo cero, son satélites de Saturno. Un año antes, las naves espaciales habían pasado cerca de Europa y Ganimedes, satélites de Júpiter, gigantes helados del tamaño de la Luna y de Mercurio, respectivamente. La temperatura en su superficie es tan baja, que gases como el amoníaco, el butano o el metano pueden estar en forma sólida. Aunque se sospechaban las bajas temperaturas de estos satélites, las naves Voyager fueron las que, por primera vez, transformaron las imágenes puntuales de estos cuerpos en nuevos mundos y gracias a sus sensores confirmaron que su corteza estaba formada por rocas heladas [véase "Los satélites galileanos de Júpiter" por Laurence A. Soderblom, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1980, y "Los satélites de Saturno" por Laurence A. Soderblom y Torrence V. Johnson, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1982]. No solamente en mundos remotos es posible encontrar rocas heladas. En nuestro planeta Tierra la técnica produce una roca artificial –el hormigón– y la utiliza a temperaturas tan bajas que también el amoníaco, el butano o el metano podrían solidificarse.

¿Por qué y para qué se utiliza el hormigón helado? Son las primeras preguntas que surgen al presentar este exótico material. Veremos que hay razones de tipo económico y, en algunos casos, de seguridad, que aconsejan la utilización de estas rocas heladas para el almacenamiento de gases licuados. El desarrollo tecnológico propicia la utilización, cada vez mayor, de productos muy fríos y peligrosos por su inflamabilidad o toxicidad. Las soluciones tradicionales para almacenar estos productos son depósitos construidos con aleaciones metálicas suficientemente dúctiles y tenaces a bajas temperaturas. Por ejemplo, para almacenar metano líquido a presión atmosférica es preciso enfriar hasta 163 grados bajo cero. A medida que aumenta el tamaño de estos depósitos –más de 100.000 metros cúbicos– sube el costo y la fragilidad de la estructura, al aumentar el espesor de las paredes. En estas circunstancias el hormigón pretensado compite ventajosamente con los metales en costo, durabilidad y seguridad. El comportamiento de los depósitos de hormigón pretensado y helado ha sido tan satisfactorio, que ya se entrevén nuevas aplicaciones, desde la construcción de barcos metaneros hasta edificios para albergar imanes superconductores.

Este nuevo material –el hormigón pretensado helado– exhibe unas propiedades sorprendentes en lo relativo a su comportamiento mecánico y térmico. En primer lugar, consideramos el almacenamiento de productos criogénicos, justificando sus razones y la forma de conseguirlo. Después revisaremos las características peculiares del hormigón pretensado a temperaturas criogénicas. Finalmente, analizaremos las peculiaridades de los depósitos pretensados criogénicos y especularemos sobre las futuras aplicaciones de este material singular.

El transporte y almacenamiento de muchos gases resulta más práctico y económico cuando se hace en forma líquida. Por ejemplo, un volumen de 600 litros de gas natural, a presión atmosférica y temperatura ambiente, al licuarlo queda reducido a un litro. Las ventajas de almacenar la misma potencia calorífica en un volumen mucho menor son las que están haciendo desaparecer los grandes y clásicos depósitos de gas en las ciudades que están cambiando el gas ciudad por el gas natural.

Todos los gases pueden licuarse enfriándolos. La temperatura a la que se produce este cambio de estado, que prácticamente coincide con la de ebullición del líquido, depende de la presión a que está sometido el gas. Cuando aumenta la presión también aumenta la temperatura de ebullición –fenómeno bien conocido por las amas de casa que utilizan ollas a presión–. En consecuencia, en algunos casos es posible licuar un gas, a la temperatura ambiente, aumentando solamente la presión. Un ejemplo lo tenemos en el butano (C_4H_{10}) almacenado en las bombonas o en los encendedores de gas; a la presión atmosférica, el butano está en forma líquida a un grado centígrado bajo cero, pero si se presuriza a dos atmósferas (por encima de la presión atmosférica) se puede mantener líquido incluso a 20 grados centígrados.

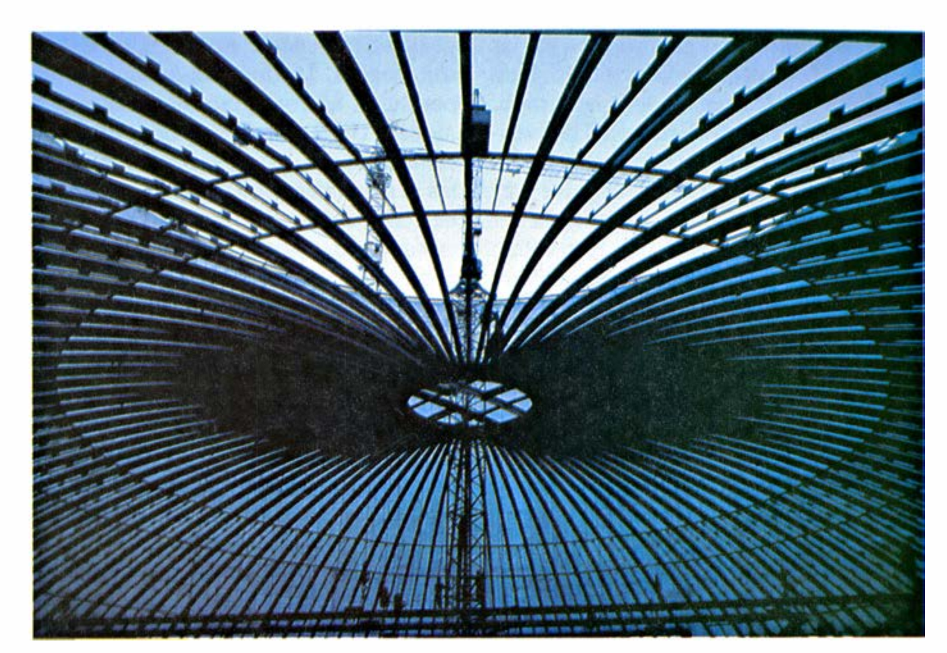
Se sabe que para cada líquido hay una temperatura, llamada crítica, por encima de la cual no es posible licuar el gas por más que se aumente la presión. Para el butano, por ejemplo, esta temperatura crítica es de 152 grados centígrados. Para el metano (CH_4) la temperatura crítica es de −83 grados centígrados y la menor presión necesaria para mantenerlo líquido a esta temperatura –presión crítica– es de 40 atmósferas. Por consiguiente, a temperaturas ligeramente inferiores a −83 °C la aplicación de una presión de 40 atmósferas bastará para licuarlo; por encima de esta temperatura no será posi-

ble licuarlo aunque se aumente la presión.

Este hecho permite, en la práctica, distinguir entre los gases (como el butano o el propano) que pueden licuarse por presión a temperaturas normales y aquellos (como el oxígeno, el nitrógeno o el gas natural) en que no es posible. Para licuar los primeros se puede escoger entre presurizarlos o enfriarlos. Para los segundos, sólo enfriándolos es posible licuarlos. El proceso inverso también es cierto; los líquidos obtenidos presurizando el gas pueden regasificarse despresurizándolos –es decir, sin aportar calor–, mientras que los líquidos que sólo se han podido obtener por refrigeración es preciso calentarlos para regasificarlos. Para el proyectista de un depósito es muy importante conocer si la licuación se ha conseguido presurizando o sólo refrigerando porque, como veremos más adelante, ello ya influye en la concepción del diseño.

El uso más generalizado del gas natural es como combustible. Su composición varía según el lugar de extracción. El componente principal –entre el 70 y el 90 por ciento– es el metano. El resto está formado por otros hidrocarburos –etano, butano, propano– junto con nitrógeno, hidrógeno y, en algunos casos, compuestos de azufre.

Aunque teóricamente es posible licuar el gas natural por presión a partir de −83 °C, es preferible poderlo almacenar y manejar a la presión atmosférica. El precio que hay que pagar por esta comodidad es una temperatura de almacenamiento más baja, alrededor de −163 °C, dependiendo de la composición exacta. En estos casos, los depósitos deben soportar solamente la presión debida al peso del líquido. Si el gas natural licuado se almacenara a temperaturas más altas, los depósitos deberían calcularse, también, como recipientes de presión.





1. LA TECNOLOGIA ACTUAL permite diseñar y construir depósitos capaces de satisfacer los mayores requisitos de seguridad. En la figura superior se muestra la estructura que soporta la cúpula del depósito almacenador de gas natural de la ciudad de Barcelona y, en la inferior, una estructura megalítica que hace más de 2000 años desempeñó una función similar —servir de soporte al techo— en una región próxima al emplazamiento del depósito del poblado de Torre d'en Gaumes, sito en la isla Menorca.

Además del gas natural licuado (GNL), también se transportan y almacenan los gases licuados del petróleo (GLP). Bajo este nombre genérico se agrupa una serie de gases obtenidos no sólo del petróleo, sino también como subproductos de la destilación del carbón y de otros procesos industriales. La mayor diferencia entre el GNL y el GLP, en relación al diseño de los depósitos para su almacenamiento, es la posibilidad de licuar el GLP a temperatura ambiente solamente por presión, ya que las temperaturas de licuación son bastante altas (para el propano −42 °C y para el butano −1 °C). En consecuencia, se prefiere almacenar el GLP a temperaturas normales en recipientes de presión –que difieren de los depósitos destinados a operar a presión atmosférica–. A pesar de las ventajas que ofrece el hormigón pretensado, los únicos recipientes de presión de gran tamaño construidos con este material son los edificios de contención de los reactores nucleares; aunque recientemente se ha despertado cierto interés por los recipientes de presión de hormigón pretensado para GLP, no se ha construido ninguno de gran tamaño. Aquí nos limitaremos a los depósitos de hormigón pretensado para GNL.

El logro de bajas temperaturas, a escala industrial, constituye un avance técnico relativamente reciente, cuyo desarrollo se retrasó hasta que se presentó la necesidad que lo impulsara. La mayoría de los gases se pueden almacenar en la planta donde se producen, en depósitos presurizados, y distribuirlos por gaseoductos. Los Estados Unidos fue el primer país que usó industrialmente el gas natural y utilizó su red de gaseoductos. Aún hoy, las ventajas económicas de la distribución mediante una red de tuberías son tan grandes que se siguen construyendo centenares de kilómetros de tubería en regiones inhóspitas o por el fondo del mar, si es preciso, a pesar del riesgo ecológico que entrañan.

No obstante, hay situaciones en las que la red de tuberías no es viable, bien por falta de tiempo o por la orografía. Por el primer motivo se inició la aventura comercial en el transporte y almacenamiento criogénicos en algunas partes de Estados Unidos, durante la segunda guerra mundial. La East Ohio Gas Company edificó en 1942 una planta para licuar gas natural y construyó cuatro depósitos metálicos para almacenarlo. La rotura de uno de estos depósitos, en octubre de 1944, provocó una catástrofe en la que fallecieron más de cien personas. Este desgraciado accidente retrasó unos diez años el desarrollo comercial del transporte y almacenamiento del GNL.

Durante los años 40 y al comienzo de los 50, las naciones energéticamente más débiles notaron cada vez más la necesidad de importar gas. La solución del gas licuado, transportado por barco y almacenado a presión atmosférica, fue la más evidente. Los primeros barcos que transportaron GNL, en 1964, tenían una capacidad de 25.000 metros cúbicos que pronto incrementaron a 40.000 metros cúbicos. En consecuencia, los depósitos de GNL en las estaciones terminales se proyectaron para 40.000 m^3. La segunda generación de barcos, a comienzos de la década de los 70, aumentó la capacidad hasta 75.000 m^3 y paralelamente lo hicieron los depósitos, que pasaron a 80.000 m^3. Actualmente, la capacidad de los barcos metaneros es de 125.000 metros cúbicos, y descargan su contenido en enormes depósitos de similar capacidad.

Los primeros depósitos fueron metálicos y su construcción no estuvo exenta de problemas. Los aceros al carbono, material normalmente utilizado en estas estructuras, no eran aceptables porque, en general, por debajo de 0 °C son frágiles. La ductilidad a bajas temperaturas se consiguió aleándolos con níquel. Un 9 por ciento de níquel fue suficiente para conseguir aceros dúctiles y soldables para muchas aplicaciones criogénicas. En otros casos, determinadas aleaciones de aluminio proporcionaron también un comportamiento satisfactorio. La fragilidad de las soldaduras preocupó a los constructores desde los primeros instantes. Todavía estaba presente el recuerdo de los barcos "Liberty", que se partieron en dos mitades cuando se construyeron los primeros depósitos que debían operar a −165 °C. No obstante, el esfuerzo realizado desde entonces ha logrado transformar procedimientos empíricos en métodos racionales que han permitido la construcción de depósitos cada vez mayores con resultados enteramente satisfactorios y seguros.

Mientras proseguía el desarrollo de estructuras soldadas se inició en los Estados Unidos la búsqueda de otras soluciones para almacenar líquidos muy fríos. En 1952, la Compañía Linde, de Chicago, construyó el primer depósito de hormigón pretensado para almacenar oxígeno licuado. La capacidad de este depósito experimental es de 2400 metros cúbicos y todavía trabaja satisfactoriamente a −185 °C. Seis años después, la American Gas Association inició una investigación destinada a comprobar el comportamiento de los depósitos de hormigón pretensado para almacenar GNL, y en 1962 instrumentó y ensayó satisfactoriamente un pequeño depósito de 170 m^3. En 1968 Gaz de France también ensayó con éxito un depósito de 2000 metros cúbicos en Nantes. Estos resultados motivaron que Gas Natural –ahora Enagas– construyera en Barcelona los dos primeros depósitos de hormigón pretensado para uso comercial, cada uno de 40.000 m^3 de capacidad. En la actualidad operan satisfactoriamente medio centenar, algunos de gran capacidad, como el de 80.000 m^3 construido en 1980, también en Barcelona, los dos de 120.000 m^3 en Montoir (Francia) y los dos gigantescos de 143.000 metros cúbicos en Staten Island, Nueva York.

Hemos comentado la utilización del gas natural licuado, su transporte y la evolución de su almacenamiento empleando un material pétreo, el hormigón pretensado. Veamos a continuación las características de esta roca artificial que la hacen tan idónea que compite con el acero.

En el hormigón armado, el acero da fibra a la piedra y el hormigón da masa al acero. De esta forma se pretende que las tracciones sean resistidas por las armaduras y las compresiones por el hormigón. Debido a que las deformaciones que puede soportar el hormigón en tracción son muy pequeñas, éste suele fisurarse antes de que las armaduras estén agotadas, y cuando tiene que resistir tracciones importantes se origina una complicada red de fisuras. Para evitar la fisuración, la mejor solución es comprimir permanentemente el hormigón sometiendo la armadura de acero permanentemente a tensión. Esta solución es, más o menos, lo que se conoce como *hormigón pretensado*; aunque parece ser que ya fue puesta en práctica a finales del siglo pasado, sólo recientemente se está aplicando en gran escala.

¿Cómo se comportará este nuevo material –el hormigón pretensado– a muy bajas temperaturas? Si nos guiamos por la intuición podemos pensar que el hormigón, intrínsecamente frágil, no mejorará sus características. En cuanto al acero, si se trata de un acero al carbono –no aleado– podemos sospechar que irá fragilizándose a medida que disminuya la temperatura. Cabe esperar, pues, que el comportamiento del hormigón pretensado empeore a medida que descienda la temperatura e incluso, como se llegó a afirmar, que a la temperatura del GNL se comporte con la fragilidad del vidrio. Por suerte no es así; los experimentos han demostrado que la intuición puede engañarnos y que el hormigón pretensado puede exhibir un comportamiento igual –o mejor– al de la temperatura ambiente.

Analicemos el comportamiento de los materiales a medida que disminuye la temperatura. Si ensayamos a compresión una probeta de hormigón saturada con agua, nos encontramos con un

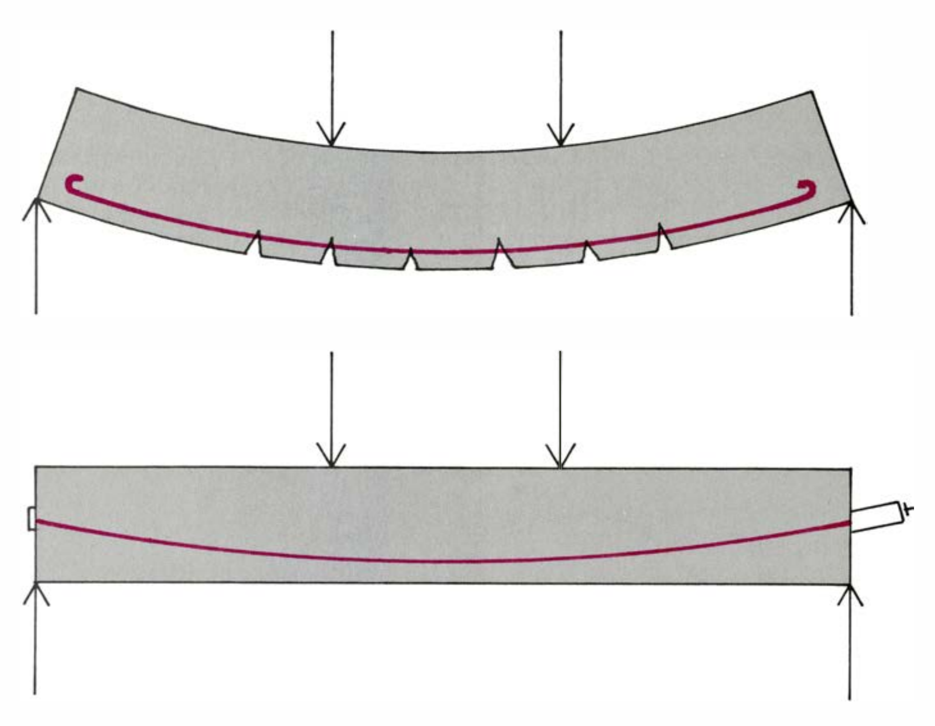
COMPONENTES	MAR DEL NORTE	ARGELIA	LIBIA	USA	ALASKA	SAJALIN
METANO	94	84-88	67-70	89	96	97
ETANO	4	8-11	15-20	6	2	<2
PROPANO	<1	2-3	9-10	1	1	<1
BUTANO	<1	1	3	0	<1	0
PENTANO	<1	<1	<1	1	0	0
NITROGENO	<1	<1	<1	3	<1	1

2. COMPOSICION MEDIA DEL GAS NATURAL. Las proporciones indicadas son en porcentaje del volumen y corresponden al pretratamiento. Se ha observado que la composición varía con el tiempo.

comportamiento sorprendente. Por debajo de 0 ºC, mientras que la ductilidad aumenta ligeramente, la carga de rotura lo hace de forma espectacular, llegando a alcanzar valores superiores a cuatro veces el valor a temperatura ambiente [*véase la figura 4*].

No se conoce, todavía, una explicación satisfactoria para este comportamiento del hormigón. Debe tenerse presente que no se trata, simplemente, de un hormigón que se ha enfriado, sino de un material compuesto por hormigón y hielo, y que las propiedades de este último no nos son tan familiares. Al helarse el agua contenida en los poros se produce un micropretensado del hormigón –debido al aumento de volumen del agua– que cierra las fisuras microscópicas, siempre presentes en el hormigón y causantes de su fragilidad, y en consecuencia, tanto la resistencia como la ductilidad aumentan. Esta explicación cualitativa del fenómeno justifica también el hecho experimental de que el comportamiento observado dependa de la cantidad de agua en el hormigón capaz de transformarse en hielo.

Estas sorprendentes propiedades se mantienen siempre que no fatiguemos excesivamente al hormigón, es decir, que una vez enfriado no lo calentemos y lo enfriemos repetidas veces. El hielo y el deshielo en el interior del hormigón producen un agrietamiento interno que acaba debilitando su estructura y se manifiesta, en posteriores ensayos de compresión, por una disminución de la resistencia y del módulo de elasticidad. En la práctica no es de esperar que se den estas circunstancias en un depósito criogénico, ya que una vez construido –a temperatura ambiente– el depósito se enfría hasta la temperatura de operación (−163 ºC para el GNL) y no está previsto que se vuelva a calentar durante su vida útil.



3. HORMIGON, débil a tracción y resistente a compresión. El hormigón se comprime —mediante un tendón de acero tensado— para que el conjunto pueda soportar tracciones. Esto es, en esencia, el hormigón pretensado. En la figura superior se representa una viga de hormigón armado, en la que aparecen fisuras y deformaciones excesivas, debido a las cargas que soporta. En la figura inferior se ha representado una viga de hormigón pretensado donde existen fisuras y las deformaciones son menores.

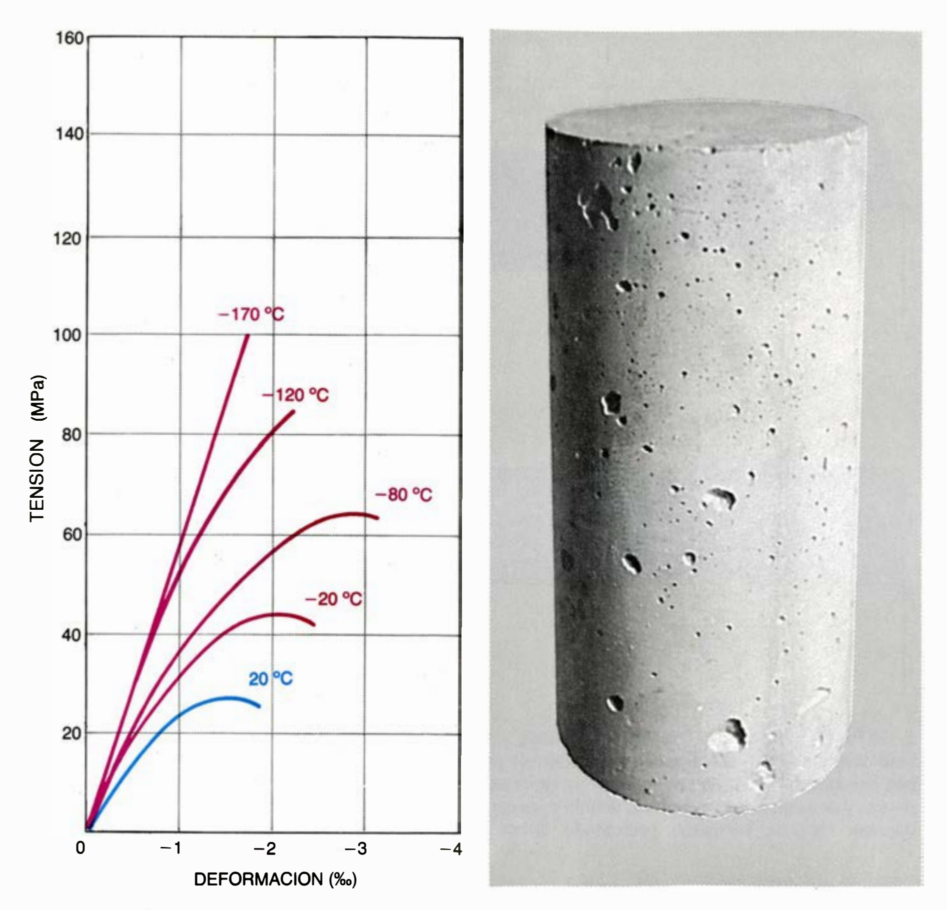
La experiencia que se posee a bajas temperaturas con los aceros no aleados –la pérdida de ductilidad y su fragilización– puede hacer sospechar que los aceros utilizados en el hormigón pretensado no son aptos para trabajar a las temperaturas del GNL. No obstante, los resultados experimentales obtenidos en nuestro laboratorio con aceros trefilados demuestran lo contrario: la resistencia a tracción y el límite elástico aumentan ligeramente al disminuir la temperatura, y la ductilidad –medida como alargamiento bajo carga máxima– apenas disminuye si se consigue mantener uniforme la temperatura de la probeta durante el ensayo. La importancia de esta condición, poco conocida, hace dudar de la validez de muchos resultados recién publicados que, posiblemente, infravaloren el alargamiento bajo carga máxima.

El problema de la sensibilidad a las entallas a bajas temperaturas merece comentarse. (La presencia de entallas puede inducir fragilidad.) Para algunos proyectistas se trata de un mero problema académico, mientras que para otros es tan temible que propugnan que no se utilice el hormigón pretensado a muy bajas temperaturas por el riesgo de la rotura frágil. En estos casos conviene aclarar que los tendones utilizados en el hormigón pretensado siempre están solicitados longitudinalmente y no transversalmente –como se hace en los ensayos normalizados de impacto para estudiar la sensibilidad a las entallas–, que es donde exhiben la fragilidad a bajas temperaturas y de donde proviene, posiblemente, su temor. En la práctica, la fragilidad de los tendones puede provocarse si existen fisuras, porque al tensarlos se producirá una concentración de tensión en el fondo de las grietas.

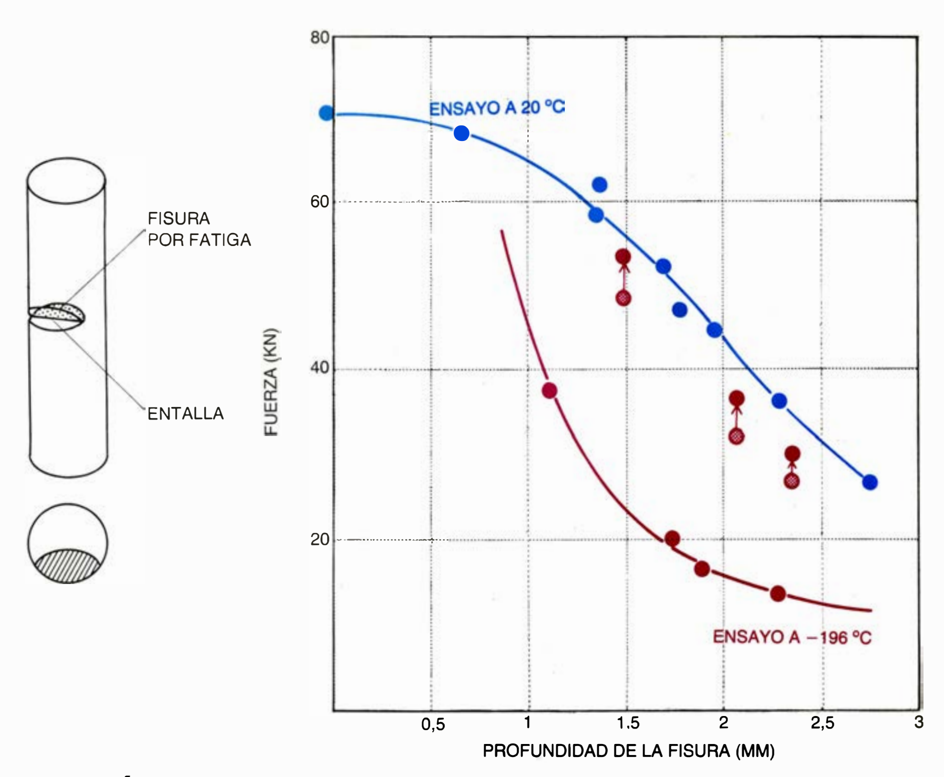
Existe el riesgo de que algún tendón tenga pequeñas fisuras, originadas durante el transporte, almacenamiento o colocación de las armaduras. Estas fisuras no merman apreciablemente la capacidad resistente del tendón ya que, por ejemplo, los alambres que se utilizan frecuentemente de 7 milímetros de diámetro pueden soportar, a temperatura ambiente, esfuerzos del 90 por ciento de la carga de rotura, con fisuras de hasta un milímetro de profundidad, como se indica en la figura 5. Si el alambre fisurado se tesa primero y se enfría después, como suele suceder normalmente, sigue exhibiendo un comportamiento bastante dúctil. Pero si primero se enfría y se tesa luego, puede romper frágilmente [*véase la figura 5*]. Este comportamiento debe tenerse en cuenta en las estructuras dotadas de tendones redundantes, que sólo entrarían en carga en caso de accidente, es decir, posiblemente se tesarían estando fríos.

Hemos visto que tanto el acero como el hormigón mejoran sus propiedades, no todas, a medida que disminuye la temperatura. El hormigón incrementa la resistencia y el módulo de elasticidad. En el acero de pretensado estas dos magnitudes también aumentan, pero en menor proporción que en el hormigón. Mas no basta con que los materiales se comporten satisfactoriamente; es el conjunto –el hormigón pretensado– el que debe hacerlo y, para ello, deben analizarse los aspectos específicos del material y los relacionados con la compatibilidad de los componentes. Comentemos algunos aspectos de la compatibilidad térmica.

Es una circunstancia afortunada que



4. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON a bajas temperaturas. Si ensayamos a compresión una probeta de hormigón saturada con agua, nos encontramos con un comportamiento sorprendente. Por debajo de cero grados Celsius, mientras que la ductilidad aumenta ligeramente, la carga de rotura lo hace de forma espectacular, y alcanza valores superiores a cuatro veces el valor a temperatura ambiente.



5. PEQUEÑAS FISURAS EN EL ACERO no merman la capacidad resistente de un tendón para pretensar el hormigón. Por ejemplo, un alambre de 7 milímetros de diámetro con una fisura de hasta 1 milímetro de profundidad puede soportar una carga del 90 por ciento de la carga de rotura. Si el alambre, con fisuras mayores, se tesa a temperatura ambiente (hasta una carga representada por círculos abiertos) y se enfría después, sigue exhibiendo un comportamiento bastante dúctil (no rompe hasta que se alcanza la carga representada por puntos rojos). Pero si primero se enfría y se tesa después, rompe frágilmente.

el hormigón y el acero tengan un coeficiente de dilatación prácticamente igual en el intervalo de temperaturas en que se utilizan normalmente. Así, una misma variación de temperatura en ambos materiales induce dilataciones análogas y, en consecuencia, no se provoca la aparición de tensiones internas por incompatibilidad de deformaciones. Esta coincidencia –o este matrimonio feliz entre los dos materiales– no tiene por qué mantenerse a bajas temperaturas y, desgraciadamente, así es, como se indica en la figura 6, donde se ha representado la contracción del acero y de dos tipos de hormigón –uno saturado con agua y otro seco– desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del GNL. En la figura se aprecia que el acero tiene tendencia a contraerse más que el homigón y que la contracción del hormigón depende del grado de humedad. Veamos, con un poco más de detalle, las consecuencias que pueden acarrear las diferencias entre los coeficientes de dilatación del acero y del hormigón saturado.

La presencia de hormigón con un alto contenido de humedad en una estructura es frecuente en construcciones junto al mar y cuando hay superficies impermeables, porque el hormigón que ha fraguado junto a ellas puede retener una humedad considerable. Al considerar el comportamiento conjunto a bajas temperaturas del hormigón saturado y del acero, es fácil deducir de la figura 6 que el acero entra en tracción porque el hormigón no le deja acortarse todo lo que quisiera estando libre. El cálculo de estas tensiones internas, originadas por la incompatibilidad de las deformaciones, es sencillo y muestra que son grandes –tanto que podrían romper algunos tipos de acero–. Este inquietante resultado motivó una serie de estudios en nuestro laboratorio para comprobar el alcance de este fenómeno.

Al principio se estudió la dilatación de simples cilindros de hormigón saturado, comprobándose que su comportamiento era el de la figura 6. Después, con objeto de simular el comportamiento del hormigón pretensado se estudió la dilatación de cilindros de hormigón saturado sometidos a una compresión del orden de la que soportan las estructuras reales, y se obtuvo la primera sorpresa: el hormigón saturado comprimido se comporta como el hormigón seco, es decir, muy parecido al acero, y por lo tanto no era de esperar la manifestación de grandes tensiones internas [*véase la figura 6*].

El paso siguiente consistió en construir una viga de hormigón saturado y

pretensado, enfriarla y medir si se producía un retesado en el tendón debido a las diferencias entre los coeficientes de dilatación. Si el efecto que habíamos descubierto con las probetas de hormigón bajo carga era representativo, no cabía esperar ninguna variación en la tensión del acero. En el caso contrario –en el supuesto de que el coeficiente de dilatación no dependiera de la tensión impuesta– deberíamos medir un apreciable aumento de la tensión en el acero. Los resultados del experimento nos indicaron que la carga del tendón apenas variaba, conclusión que no sólo facilita los cálculos de las estructuras a muy bajas temperaturas, sino que posibilita su construcción en algunos casos. Vemos pues que la aparente incompatibilidad de los materiales a bajas temperaturas se ha resuelto cediendo uno de los dos; en este caso, adaptándose el más versátil –el hormigón–. Después de habernos acercado al material, conociendo su comportamiento y peculiaridades a bajas temperaturas, pasemos a considerar *la estructura*.

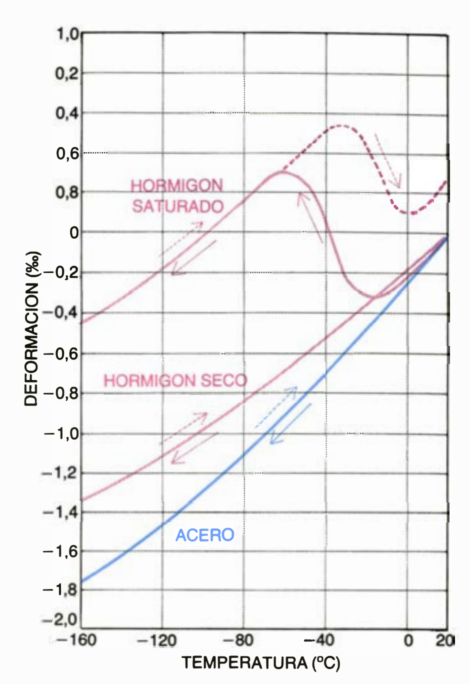
La tipología de los actuales depósitos criogénicos es consecuencia de la natural evolución de los primitivos depósitos de petróleo. Los primeros depósitos eran recipientes cilíndricos cubiertos por un material aislante y rodeados a una cierta distancia de un pequeño muro, cuya función era retener el líquido en caso de que se produjera un derrame de GNL. Pronto se observaron los inconvenientes de situar lejos el murete. En un accidente, el líquido mojaría una gran superficie caliente y, en consecuencia, se formaría una extensa nube baja e inflamable que saldría fácilmente del recinto. El paso siguiente consistió en la construcción de un muro mucho más próximo al depósito y, por tanto, más alto, para que en caso de accidente retuviera el líquido y dificultara la formación de la nube baja capaz de iniciar una reacción en cadena en los depósitos vecinos. La siguiente innovación fue una consecuencia lógica al haber construido un muro de seguridad y consistió en cerrar el muro mediante una cúpula para proteger completamente el depósito de acciones exteriores. El resultado final ha sido la integración de las paredes de protección en un segundo depósito creando el concepto de sistema de doble contención. Veamos ahora la razón de ser y la misión que cumplen algunos componentes de estas exóticas estructuras.

Un depósito criogénico debe desempeñar satisfactoriamente cuatro funciones: almacenar el líquido sin que se produzcan pérdidas, conseguir que el líquido se caliente lo menos posible, ser estanco en los dos sentidos para evitar accidentes (es decir, el gas no debe escaparse al exterior ni debe entrar aire o vapor de agua hacia el interior) y, por último, si por alguna causa el depósito se rompe, procurar que las consecuencias catastróficas sean mínimas. Este último requisito tiene una enorme influencia en la concepción del diseño.

La misión primordial del depósito interno es contener el líquido frío sin que se produzcan fugas o filtraciones. El GNL es un líquido muy penetrante y de baja viscosidad –alrededor de 0,14 veces la del agua–, por lo que todas las precauciones que se tomen para evitar filtraciones serán pocas. Se han hecho ensayos para determinar la permeabilidad del hormigón al GNL; en general se ha comprobado que el hormigón seco, aunque sea de excelente calidad, es bastante permeable; por el contrario, el hormigón con un alto contenido de humedad es prácticamente impermeable. No obstante, todavía no se dispone de suficiente información fiable que permita a los proyectistas confiar en la impermeabilidad del hormigón y, en consecuencia, las paredes del depósito se proyectan con una camisa de acero, que asegura la estanqueidad, embebida dentro del hormigón, como puede apreciarse en la figura 11. También se ven las vainas que contendrán los tendones encargados del pretensado vertical. El pretensado circunferencial se consigue arrollando un alambre tenso sobre la camisa de acero, una vez que el hormigón ha endurecido.

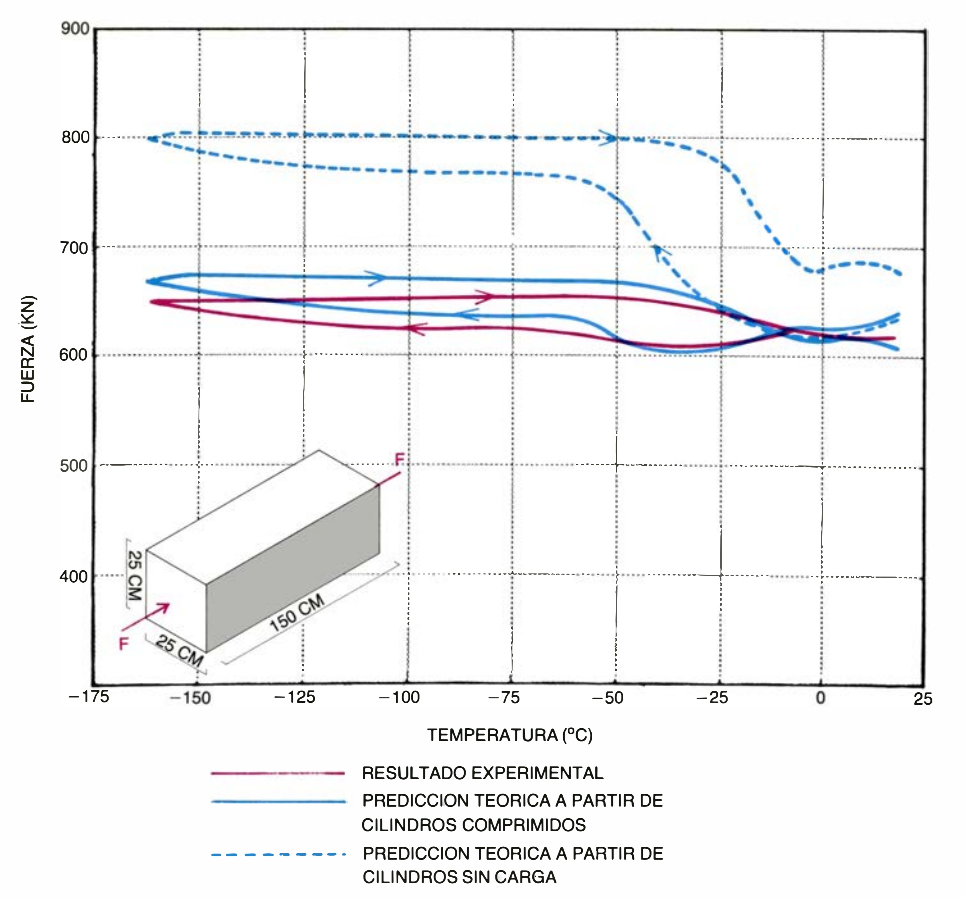
La diferencia entre la temperatura ambiente y el interior del depósito es alrededor de 200 °C. Esta enorme diferencia puede ocasionar movimientos por retracción muy superiores a los que está acostumbrado el proyectista. Por ejemplo, un depósito de hormigón como el de Barcelona, de 55 metros de diámetro interior, al enfriarse puede retraer alrededor de 100 milímetros y debe estar proyectado de tal forma que permita estos movimientos sin crear tensiones excesivas.

Es obvio que el depósito interior debe aislarse térmicamente para evitar la gasificación del GNL. En la práctica, el aislamiento de las paredes y del techo suele hacerse con material granular o suelto, mientras que el fondo reposa sobre bloques de material aislante. El material granular más utilizado es la perlita, que es un mineral expandido. En cuanto a los aislantes con capacidad resistente, además del poliuretano se utilizan vidrios y plásticos espumados y madera de balsa. En general, la eficiencia térmica de un aislante aumenta con el contenido en aire y, por consiguiente, los buenos aislantes son ligeros y poco resistentes. Los aislantes resistentes, pesados por lo común, sacrifican parte de la eficacia térmica por la capacidad de transmitir esfuerzos.



6. DILATACION del hormigón y del acero. El hormigón seco y el acero presentan un comportamiento similar. El hormigón saturado, sin carga, exhibe primero una expansión irreversible –mientras el agua se transforma en hielo– y después una contracción. Tras un ciclo térmico –enfriamiento y calentamiento– aparece una expansión remanente debida, posiblemente, al deterioro del hormigón causado por la transformación del agua en hielo.

Como ningún aislante es perfecto, algo de calor acaba entrando en el depósito. En algunos depósitos, parte de este calor proviene del suelo y a medida que pasa el tiempo la cimentación se va enfriando cada vez más. Al final acaba formándose hielo y el terreno subyacente se deforma dando lugar a asientos diferenciales que causan inconvenientes y que pueden acabar provocando roturas. Por este motivo se procura evitar los depósitos enterrados o en contacto directo con el terreno. Esta situación se corrige calentando el fondo mediante resistencias eléctricas o bien levantándolo y permitiendo circular aire entre el fondo y la cimentación. El calor que inevitablemente penetra en el depósito evapora una pequeña cantidad de líquido. (A esta pequeña ebullición se la conoce como "boil-off".) Por ejemplo, en un depósito de 80.000 m^3, cada día se convierten en gas entre 9 y 11 toneladas de líquido. Esta cantidad es demasiado valiosa



7. COMPROBACION EXPERIMENTAL de la compatibilidad entre el hormigón y el acero, en el hormigón pretensado. Si el efecto que habíamos descubierto con las probetas de hormigón bajo carga hubiera sido representativo, no cabría esperar ninguna variación en la tensión del acero. En el caso contrario –en el supuesto de que la dilatación no dependiera de la tensión impuesta– deberíamos medir un apreciable aumento de la tensión en el acero. El experimento mostró que la tensión en el acero apenas variaba durante el ciclo térmico. Este resultado no sólo facilita los cálculos a bajas temperaturas sino que, en algunos casos, posibilita la utilización del hormigón pretensado en construcciones criogénicas.

para desperdiciarla y se toman las medidas necesarias para recuperar el gas y volverlo a licuar.

El depósito exterior opera a temperatura ambiente en condiciones normales; solamente en caso de accidente debe ser capaz de retener el líquido frío. Aun cuando el GNL llegara a inflamarse, habrá de permitir su combustión sin perder la integridad del depósito. Esta es una condición muy dura, ya que en dichas circunstancias la parte inferior de la pared –en contacto con el GNL– estará a −165 ºC y, escasamente a 2 ó 3 metros por encima, la pared estará a 1.350 ºC –debido al fuego–. En la práctica se ha demostrado que el hormigón pretensado puede soportar estas situaciones, y el accidente ocurrido en 1973 en Staten Island –donde el fuego duró unas 18 horas sin destruir las paredes– es una clara, aunque no deseable, demostración a escala natural.

Anteriormente se indicó que el depósito debe ser estanco en los dos sentidos: no sólo debe evitarse que el gas salga al exterior, sino también que el aire o el vapor de agua entren en el interior. Si el vapor de agua penetra, emigrará hacia el depósito interior –que está frío– y aumentará la conductividad calorífica del aislante, reduciendo su eficacia. Por este motivo los depósitos exteriores de hormigón armado o pretensado se construyen con una segunda barrera de vapor, o camisa de chapa. En algunas circunstancias se requiere que el depósito exterior sea capaz de soportar acciones externas singulares, como el impacto de un avión de determinadas características –si está cerca de un aeropuerto–. La tecnología actual permite diseñar y construir depósitos que cumplan estos requisitos.

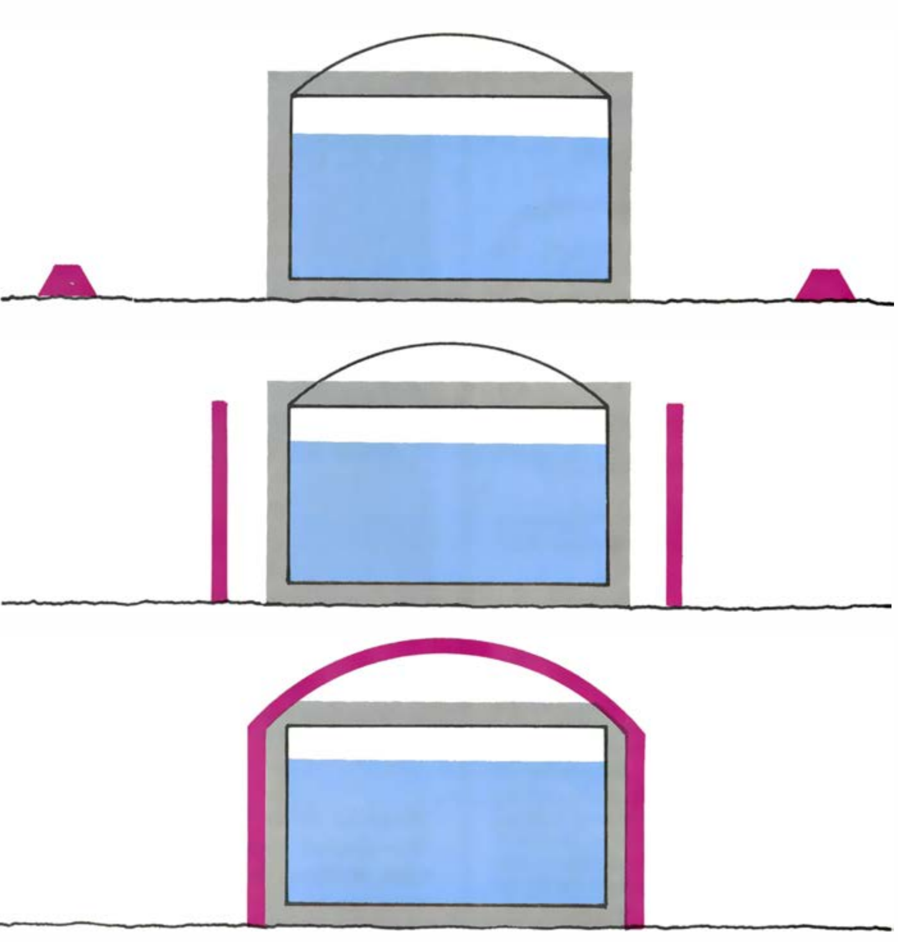
Para terminar consideremos algunos aspectos relacionados con la seguridad. En estos casos el objetivo primario del depósito externo es contener el GNL y retenerlo mientras se quema. Después, este depósito quedará inutilizado. Cuando se trate de otros líquidos criogénicos, los requisitos primarios pueden ser distintos. Por ejemplo, en el caso de gases licuados tóxicos deberá garantizarse la estanqueidad por encima de todo, en vez de asegurar una combustión controlada. Un derrame de amoníaco licuado puede ser catastrófico si el viento arrastra al gas sobre una región poblada, porque se trata de un gas tóxico. Recientemente se han producido accidentes dramáticos que han puesto de relieve la necesidad de extremar estas medidas de seguridad.

Hace 75 años que surcó el mar el primer barco de hormigón armado y casi medio siglo que lo hizo por primera vez uno de hormigón pretensado. Entre los mayores inconvenientes de los barcos de hormigón está su peso, por cuyo motivo se han utilizado sólo para transportar mercancías de poca densidad, y el GNL es una de las mercancías más ligeras. Existen varios proyectos para la construcción de superdepósitos criogénicos flotantes para transportar GNL. Una de las grandes ventajas frente a los barcos metálicos es su mejor resistencia al impacto. Así como el impacto de un avión sobre un depósito de GNL es muy probable que no ocurra durante la vida de la estructura, la colisión de dos barcos metaneros –si aumenta la demanda de gas– estadísticamente es muy probable que ocurra dentro de unos años. La superioridad del hormigón pretensado frente a la estructura metálica, en caso de impacto, se debe a la mayor tenacidad y redundancia de la primera frente a la segunda. En una estructura pretensada, la rotura de un tendón debe influir poco en los restantes y, de originarse una grieta, es posible que vuelva a cerrarse, mientras que en un depósito metálico una grieta grande puede arruinar la estructura. En este sentido se orienta la moderna normativa sobre seguridad. Cada vez es más frecuente –y en algunos países obligatorio– que los depósitos criogénicos metálicos se rodeen de paredes protectoras de hormigón pretensado.

Entre los inconvenientes para la utilización del hormigón pretensado en los cascos de los barcos también está su resistencia a la fatiga. No obstante, ensayos realizados por B. Gerwick, Jr., de la Universidad de California en Berkeley, indican un comportamiento satisfactorio del hormigón pretensado sometido a fatiga a temperaturas del GNL. Por otra parte, se cree que con la utilización de hormigones especiales se podría reducir el peso en un 30 por ciento. Aunque todavía el casco de hormigón seguiría siendo más pesado que el de acero, la diferencia se acortaría significativamente.

El "Contranstor" es uno de los dos

proyectos más importantes destinados a transportar GNL mediante barcos de hormigón pretensado. El proyecto lo inició la compañía suiza International Gas Storage and Transport y fue desarrollado en cooperación con Taylor Woodrow International. Se han proyectado barcos de 25.000 toneladas, de 200 metros de eslora por 35 metros de manga. La estructura es celular y los depósitos son de doble pared. El otro proyecto, el "Dytam", es un barco de 56.000 toneladas, desarrollado por la compañía americana Tampimex en colaboración con la alemana Dyckerhoff y Widmann. La eslora del barco es de 290 metros y la manga de 44 metros. El espesor del casco es de medio metro y está dividido en diez compartimentos. Un análisis de estos proyectos indica no sólo una mayor seguridad, sino también un ahorro en el mantenimiento y en la construcción del orden del 15 por ciento. Ambos proyectos se han aprobado por la compañía aseguradora Lloyd y, además, el "Dytam" por la United States Coast Guard.



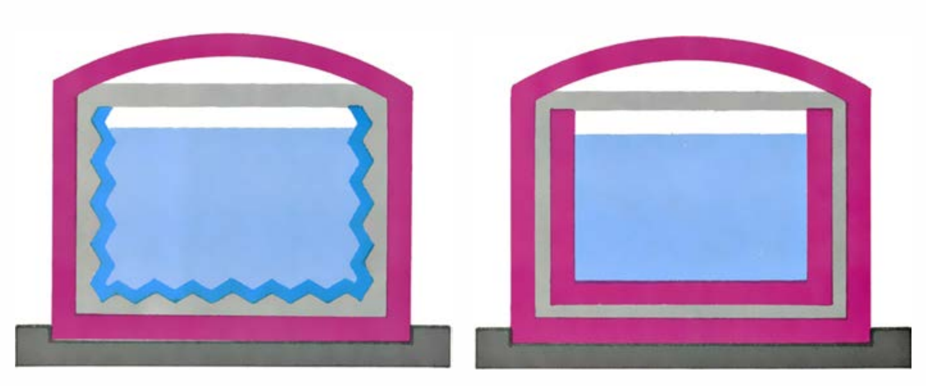
8. EVOLUCION DE LOS DEPOSITOS para almacenamiento de GNL. Los primeros depósitos eran recipientes cilíndricos cubiertos por un material aislante y rodeados por un murete, cuya función era retener el líquido en caso de que se produjera un derrame de GNL. El paso siguiente consistió en la construcción de un muro mucho más próximo al depósito y por lo tanto más alto, para que en caso de accidente retuviera el líquido y dificultara la formación de la nube baja capaz de iniciar una reacción en cadena en los depósitos vecinos. La siguiente innovación consistió en cerrar el muro mediante una cúpula para proteger el depósito del exterior, integrando las paredes de protección en un segundo depósito.

La utilización de los depósitos criogénicos de hormigón pretensado en los casquetes polares constituye otro sueño de los ingenieros. Los recientes proyectos para explotar los recursos del Artico y del Antártico han estimulado el interés en el desarrollo de plataformas en mar abierto, primero para perforaciones exploratorias y después para producción. Estas plataformas se construirían en regiones templadas de los Estados Unidos, Japón o Corea y, luego, se transportarían al océano glacial Artico. Este tipo de estructuras debe ser capaz de soportar presiones locales, debidas al hielo, del orden de 1000 toneladas por metro cuadrado. El hormigón, adecuadamente pretensado y reforzado, es dúctil y rígido y puede resistir este tipo de impactos a bajas temperaturas. Diversas empresas están realizando ensayos de campo y de laboratorio para estudiar el comportamiento del hormigón en el ambiente ártico, en particular los ciclos de hielo-deshielo alrededor de la línea de flotación y la abrasión debida al roce con el hielo. La experiencia con estructuras pretensadas en la isla de Tarsint, en el mar de Beaufort, es alentadora. La utilización del hormigón pretensado para la construcción de plataformas móviles para perforaciones está aceptada por la industria y por los organismos reguladores. Una estructura de este tipo, la Global Marine "Super CIDS", está construyéndose en Japón.

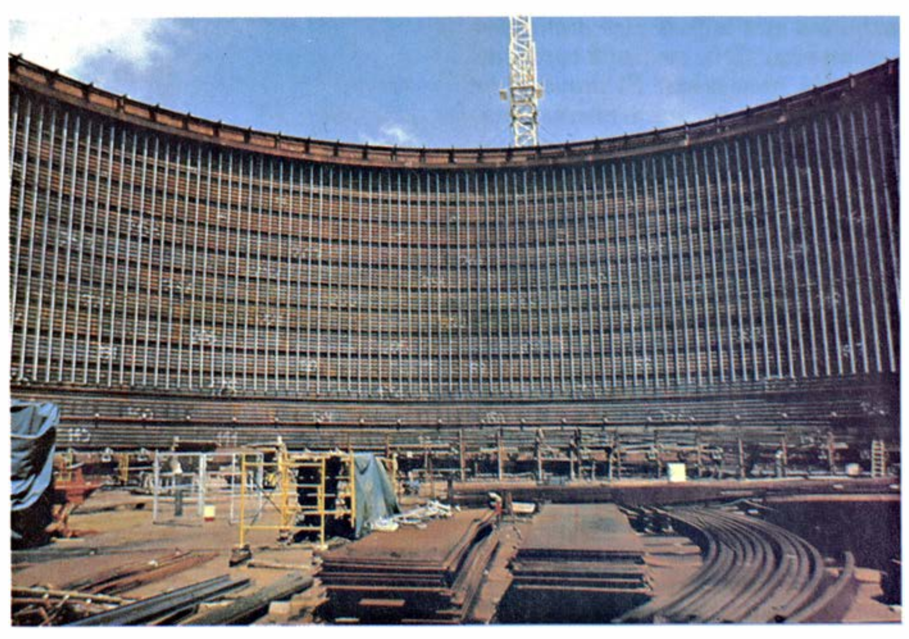
Pero la imaginación de los proyectistas va más lejos. La explotación integral de las reservas petrolíferas del Artico requerirá el transporte sobre el hielo o bajo él. Estas estructuras deberán ser capaces de resistir impactos, socavones en el hielo y grandes presiones en el caso de depósitos submarinos. Se cree que estas estructuras podrían ser mixtas, de hormigón pretensado y acero, donde se aprovecharían al máximo las características de los nuevos hormigones de alta resistencia.

Las aplicaciones potenciales de este nuevo material no terminan en los depósitos criogénicos. El desarrollo industrial de grandes dispositivos superconductores necesitará estructuras económicas que sean resistentes a muy bajas temperaturas, y nuevamente el hormigón –las rocas heladas fabricadas por el hombre– se presenta como un candidato indiscutible.

En 1975, alrededor de 30 expertos se reunieron durante 10 semanas, bajo los



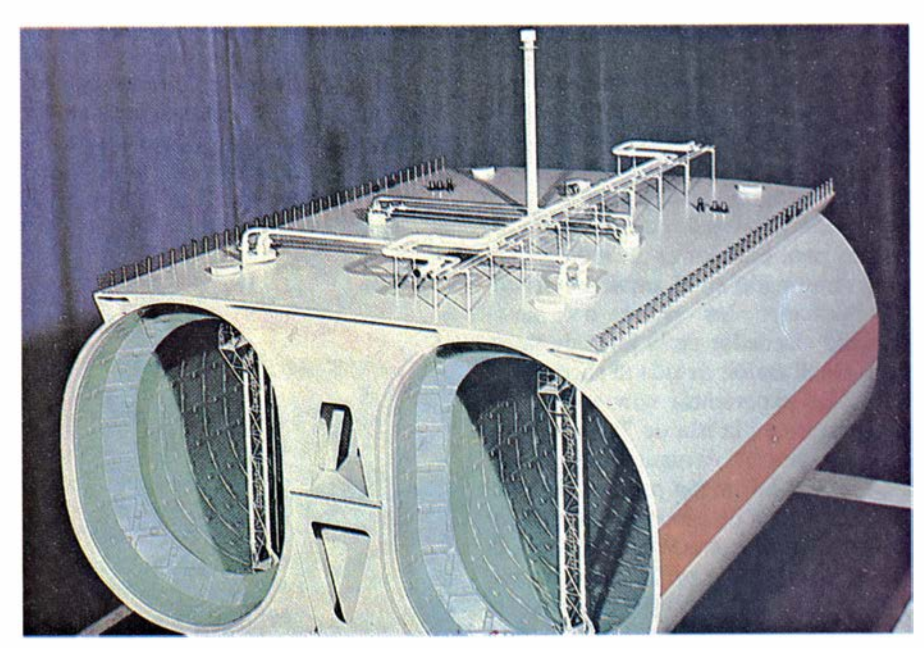
9. DEPOSITOS DE DOBLE PARED. En la figura izquierda la pared interior es flexible y se apoya en la pared exterior; en la figura derecha la pared interior es rígida, de acero o de hormigón pretensado.



10. DETALLE DEL DEPOSITO INTERIOR de hormigón pretensado, de 80.000 metros cúbicos, de Barcelona (España), durante la fase de construcción. Se puede apreciar la camisa de acero, que asegurará la estanqueidad y que servirá de encofrado para hormigonar, luego, la pared. Los tubos verticales son las vainas por donde se enhebrarán luego los tendones de acero para el pretensado vertical de la pared.

auspicios de la NASA, para proyectar una ciudad espacial. Para su realización, millares de toneladas de materiales procedentes de la Luna y asteroides se utilizarían para construir un gigantesco tubo circular –un toro– de casi dos kilómetros de diámetro. Esta ciudad está proyectada para albergar una colonia de 10.000 habitantes, con escuelas para los nacidos en el espacio, jardines, campos de deporte y fábricas en las que se podrán desarrollar materiales y medicamentos.

Este artículo empezó describiendo cómo las naves espaciales se habían encontrado con enormes rocas a la temperatura del GNL. Se ha descubierto que el hormigón criogénico –una roca helada fabricada por el hombre– es el estado natural de pequeños mundos que vagan por el espacio. ¿Acaso no podría utilizarse el hormigón pretensado, que ha demostrado poseer excelentes propiedades a temperaturas siderales, para la construcción de las ciudades espaciales? Si dejamos volar la imaginación podremos intuir que quizás, en un futuro no muy lejano, el hormigón pretensado tenga un lugar entre los viajeros de las estrellas.



11. SECCION DEL CASCO del supermetanero Dytam, de 56.000 ton., desarrollado por la compañía americana Tampimex en colaboración con la alemana Dyckerboff y Widemann. La eslora es de 290 m y la manga de 44 m. El casco tiene un espesor de medio metro y está dividido en 10 compartimientos.

Los satélites de Urano, Neptuno y Plutón

Cuando el Voyager 2 se acerque a Urano en enero del año próximo y a Neptuno en 1989, enviará fotografías de sus satélites. Varios estudios del sistema solar exterior realizados desde la Tierra sugieren qué podría encontrar esa sonda

Robert Hamilton Brown y Dale P. Cruikshank

Hace casi exactamente 200 años, una observación realizada por un astrónomo aficionado duplicó el tamaño del sistema solar conocido. Mirando a través de un telescopio casero de 15 centímetros, William Herschel descubrió Urano, el séptimo planeta. Sesenta y cinco años después se descubrió Neptuno; como Urano, es un planeta gigante que viene a cuadruplicar el tamaño de la Tierra. Plutón, no mayor que la Luna y a doble distancia del Sol que Urano, no emergió de la oscuridad hasta 1930. Hacia esa época, gracias a astrónomos con iniciativa y a instrumentos de observación cada vez mejores, empezaba a quedar claro que los tres planetas exteriores no viajaban solos. Con el tiempo se halló que Urano tenía al menos cinco satélites y, dos como mínimo, Neptuno. En 1978 se detectó el primer satélite de Plutón en una fotografía de grano grueso del planeta.

Hasta hace poco tiempo, casi nada se conocía acerca de los satélites de Urano, Neptuno y Plutón, aparte de los parámetros de sus órbitas. En contraste con esa situación, los vehículos espaciales Pioneer y Voyager habían enviado magníficas imágenes y una gran riqueza de datos sobre los satélites de Júpiter y Saturno, transformando aquellos remotos puntos en mundos cuya historia podía reconstruirse aunque no fuera más que en escorzo. Nos hallamos en las puertas de una era semejante de descubrimientos para Urano y Neptuno. El *Voyager 2,* lanzado en agosto de 1977, pasará junto a Urano el próximo enero, a una distancia de 20.000 kilómetros del más interno de sus satélites, Miranda. El vehículo espacial se acercará luego a Neptuno en agosto de 1989, en su último encuentro antes de abandonar el sistema solar. Libres de la preocupación de tener que encauzar la sonda hacia otro destino, los directores de la misión aprovecharán a fondo el encuentro final. El *Voyager 2* pasará a unos 10.000 kilómetros del satélite más interno de Neptuno, Tritón. Se espera que las imágenes de Tritón, tomadas con una cámara de alta resolución, revelen accidentes de superficie de hasta cientos de metros de diámetro.

En preparación para las pasadas del Voyager, se ha avivado considerablemente el ritmo de las investigaciones de los satélites de Urano y Neptuno realizadas desde la Tierra. Lo mismo puede decirse de Plutón, que en ciertos aspectos se parece más a un satélite que a un planeta, y de su satélite Caronte. Este creciente interés, unido a las notables mejoras en la tecnología de detectores telescópicos, ha comenzado a suministrar datos relativos a las propiedades físicas de esos cuerpos. Lo que sigue, pues, es un anticipo: un primer vistazo, un tanto borroso, sobre el estado en que se hallan objetos que prometen contarse entre los de mayor interés científico del sistema solar.

Con telescopios instalados en tierra se aprenden varias cosas notables de los satélites planetarios remotos. Primero, se puede determinar la forma, tamaño y período de sus órbitas y acometer así predicciones precisas de sus posiciones. Más importante, el conocimiento de los parámetros orbitales de un satélite posibilita que los investigadores calculen la masa del planeta y la intensidad de su campo gravitatorio en varias posiciones. La masa del propio satélite puede deducirse con frecuencia observando las perturbaciones que induce en las órbitas de otros satélites. Conocido su diámetro, determinaremos su densidad media, el principal parámetro de su composición global.

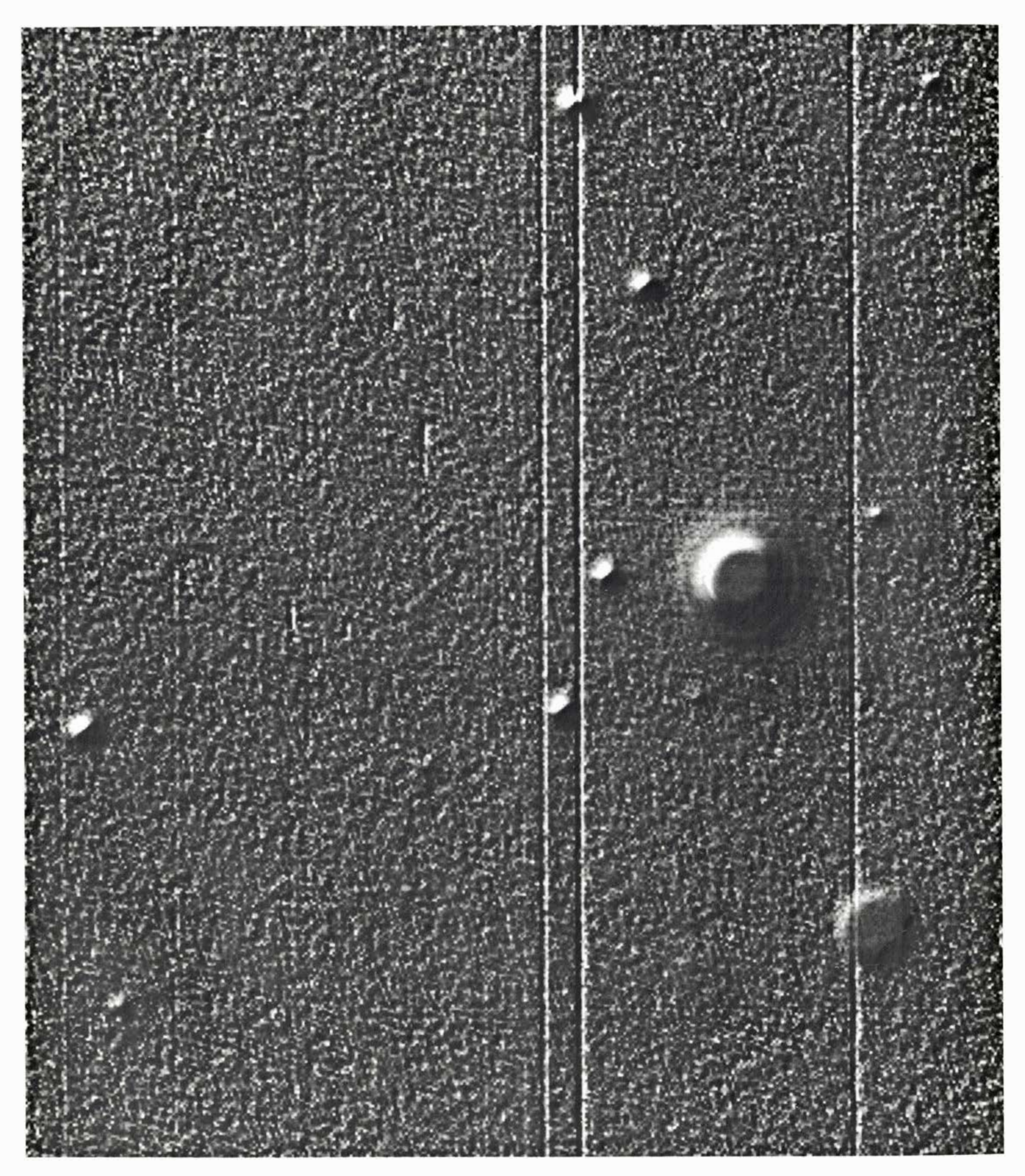
La información sobre la composición de su superficie nos llegará directamente de las bandas de absorción en el espectro de la luz solar reflejada por el satélite. Comparando el espectro observado con los espectros de laboratorio de distintos elementos o compuestos químicos, identificaremos algunos de los componentes de la superficie del satélite. Este trabajo se realiza preferentemente en la región del infrarrojo próximo (en longitudes de onda de uno a cinco micrometros), porque la mayor parte de las sustancias moleculares co-

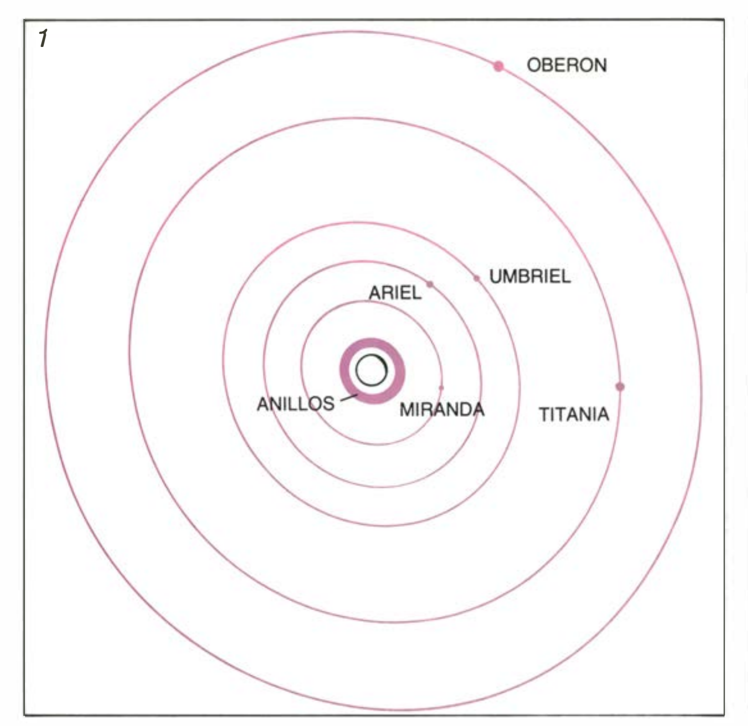


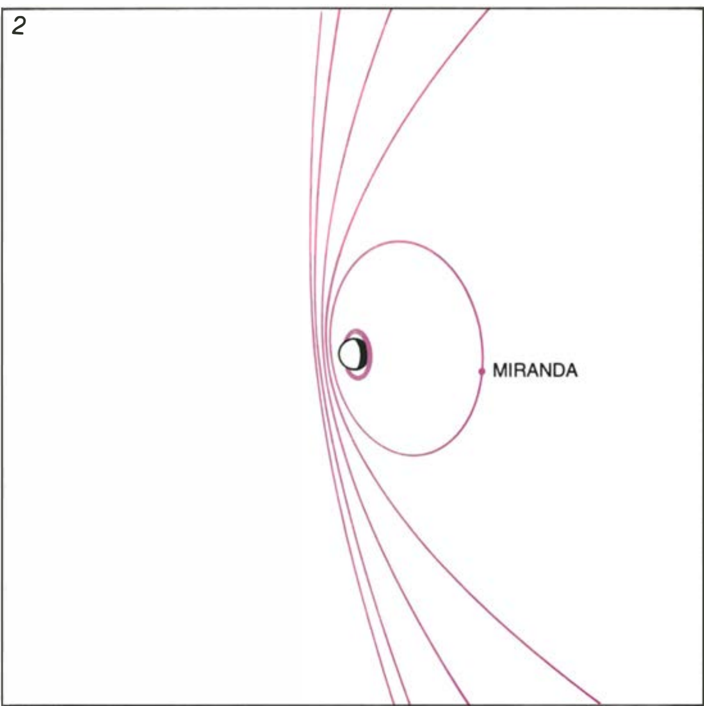
1. CINCO SATELITES DE URANO recoge esta imagen electrónica, hecha por Bradford A. Smith, de la Universidad de Arizona, y Richard J. Terrile, del Laboratorio de Propulsión a Chorro. La imagen en luz visible, producida mediante un dispositivo acoplado en carga y adaptado al telescopio de 2,5 metros de la Institución Carnegie de Washington en Chile, muestra el delgado anillo de partículas oscuras del planeta. El eje de rotación de Urano descansa casi en su plano orbital; su polo Sur está hoy dirigido hacia la Tierra y el Sol. La órbita de Miranda, el satélite más interno, está inclinada varios grados, pero los otros satélites de Urano describen órbitas en el plano ecuatorial de éste. El detector produce las líneas verticales.

munes en el sistema solar dejan intensas marcas de absorción en ese dominio. Sin embargo, aun cuando se observe a través de los mayores telescopios, la radiación reflejada por pequeños y distantes satélites resulta extraordinariamente débil. Hasta finales del decenio de 1970, los detectores infrarojos no lograrían resolverla en espectros. (Los nuevos detectores usan antimoniuro de indio en vez de sulfuro de plomo como compuesto sensible a la luz; la radiación infrarroja produce electrones libres en el antimoniuro de indio, generando una corriente eléctrica cuya intensidad es proporcional a la propia de la radiación.)

Las teorías sobre la evolución del sistema solar dan alguna idea acerca de lo que se puede esperar al investigar la composición de los cuerpos en sus re-







2. PASO DEL *VOYAGER 2* a través del sistema uraniano. Permitirá tomar una vista cercana del planeta y de Miranda. Los dibujos, adaptados de simulaciones de ordenador preparadas por los directores de la misión en el Laboratorio de Propulsión a Chorro, ofrecen vistas a través de las cámaras del vehículo espacial desde varios puntos de su trayectoria. El *Voyager 2* se está acercando al polo Sur iluminado de Urano a una velocidad de unos 53.000 kilómetros por hora. Diez días antes de su punto de mayor acercamiento al planeta, el 24 de enero de 1986, la cámara gran angular de la sonda tomará todavía la

giones exteriores. Se cree que la formación tanto de satélites como de planetas comenzó con la agregación de granos helados que se condensaron a partir de la primitiva nebulosa solar a medida que ésta se enfriaba. La composición de los granos, y por tanto de los cuerpos mayores, dependía de su distancia al Sol. En la cálida región próxima a éste sólo pueden condensarse sustancias relativamente refractarias. Como resultado, los planetas interiores —Mercurio, Venus, Tierra y Marte— son cuerpos rocosos que constan principalmente de metales y óxidos y silicatos de metales. A la distancia de Júpiter, la nebulosa solar se enfrió lo suficiente para que se formasen hielos; el hielo de agua parece constituir una parte importante de los satélites de Júpiter y el grueso de los satélites de Saturno. Todavía más lejos del Sol, en el dominio de Urano, Neptuno y Plutón, podría esperarse hielo de agua, pero también hielos de otras materias más volátiles que el agua: metano (CH_4) y amoníaco (NH_3).

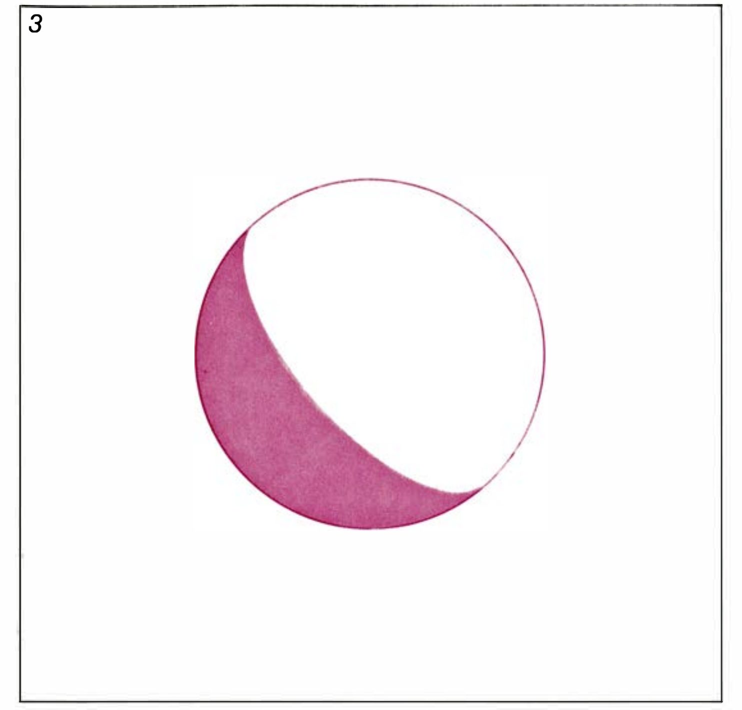
Urano y sus cinco satélites —comenzando por el más externo, son Oberón, Titania, Umbriel, Ariel y Miranda— constituyen el tercer mayor sistema satelitario después de los que poseen Júpiter y Saturno. El menor del grupo, Miranda, es seis veces más débil que el más débil de los restantes. Se descubrió en 1948, y desde entonces no se han observado nuevos satélites de Urano pese a los esfuerzos concertados de los mayores telescopios y los detectores más sensibles. El *Voyager 2* emprenderá una búsqueda intensiva. Si la experiencia con Júpiter y Saturno sirve de guía, la búsqueda puede muy bien revelar pequeños satélites que han escapado a la detección desde la Tierra.

Los satélites de Urano conocidos se mueven en órbitas casi circulares, y, excepto el de Miranda, sus planos orbitales coinciden con el plano ecuatorial del planeta dentro de algunas décimas de grado. Aunque las órbitas de los satélites son muy regulares, resulta peculiar la orientación del sistema en conjunto: está inclinada de lado, de modo que los ejes de rotación tanto del planeta como de sus satélites descansan casi en el plano orbital de aquél. Algunos investigadores atribuyen la rara orientación de Urano —así como las inclinaciones, menos extremas, de otros ejes planetarios— al impacto producido por un planeta diminuto en la primitiva historia del planeta grande. Se ha sugerido que tal catástrofe habría afectado a la evolución de los satélites de Urano, pero hasta ahora carecemos de datos suficientes para apoyar o refutar esta hipótesis.

En 1979, antes incluso de que pudieran establecerse con confianza los tamaños y las masas de los satélites de Urano, determinamos la presencia de agua helada en la superficie de los cuatro más externos. Los espectros en el infrarrojo próximo que medimos con el telescopio de cuatro metros del Observatorio Nacional de Kitt Peak mostraban todos la marca característica del hielo de agua: bandas de absorción, anchas e intensas, a longitudes de onda de 1,5 y 2,0 micrometros. En 1983, uno de nosotros (Brown) y Roger N. Clark, de la Inspección Geológica de los Estados Unidos, resolvimos el espectro de Miranda; aunque los datos eran bastante toscos, mostraban la banda de absorción de 2,0 micrometros con relativa claridad.

Para entonces, B. Thomas Soifer y sus colegas, del Instituto de Tecnología de California, habían confirmado nuestros primeros resultados. Además, sus espectros sugerían la presencia de un compuesto adicional en la superficie de los satélites de Urano. Aunque los investigadores no identificaran el nuevo componente, llegaron a la conclusión de que era apreciablemente más oscuro que el hielo de agua.

En el curso de las medidas del diámetro de los satélites de Urano, comprobamos que sus reflectividades eran realmente más bajas de lo que cabría esperar si estuvieran compuestos de hielo de agua puro y pulverizado. Vale la pena detenerse en la relación entre el diámetro y la reflectividad. Por hallarse tan lejanos los satélites de Urano, el diámetro de los discos que presentan a



totalidad del sistema satelitario (*1*). Dos horas antes del punto más próximo (*2*), el vehículo espacial se aproximará al plano ecuatorial de Urano entre las órbitas de Miranda y Ariel. Al pasar a 29.000 kilómetros de Miranda una hora más tarde, su cámara de alta resolución tomará imágenes (*3*) que quizá descubran señales de actividad volcánica, tales como ríos de hielo geológicamente recientes. Unos 13 minutos después, cuando el *Voyager 2* cruce el plano ecuatorial, las imágenes de alta resolución mostrarán el lado de Urano y el borde de sus anillos (*4*). (Los dibujos son de I. Worpole.)

los observadores terrestres no se puede medir directamente. Agréguese, además, que la intensidad mensurable de su luz reflejada no ofrece información inequívoca sobre su tamaño: un satélite de un brillo dado podría ser pequeño y altamente reflector o grande y oscuro en comparación.

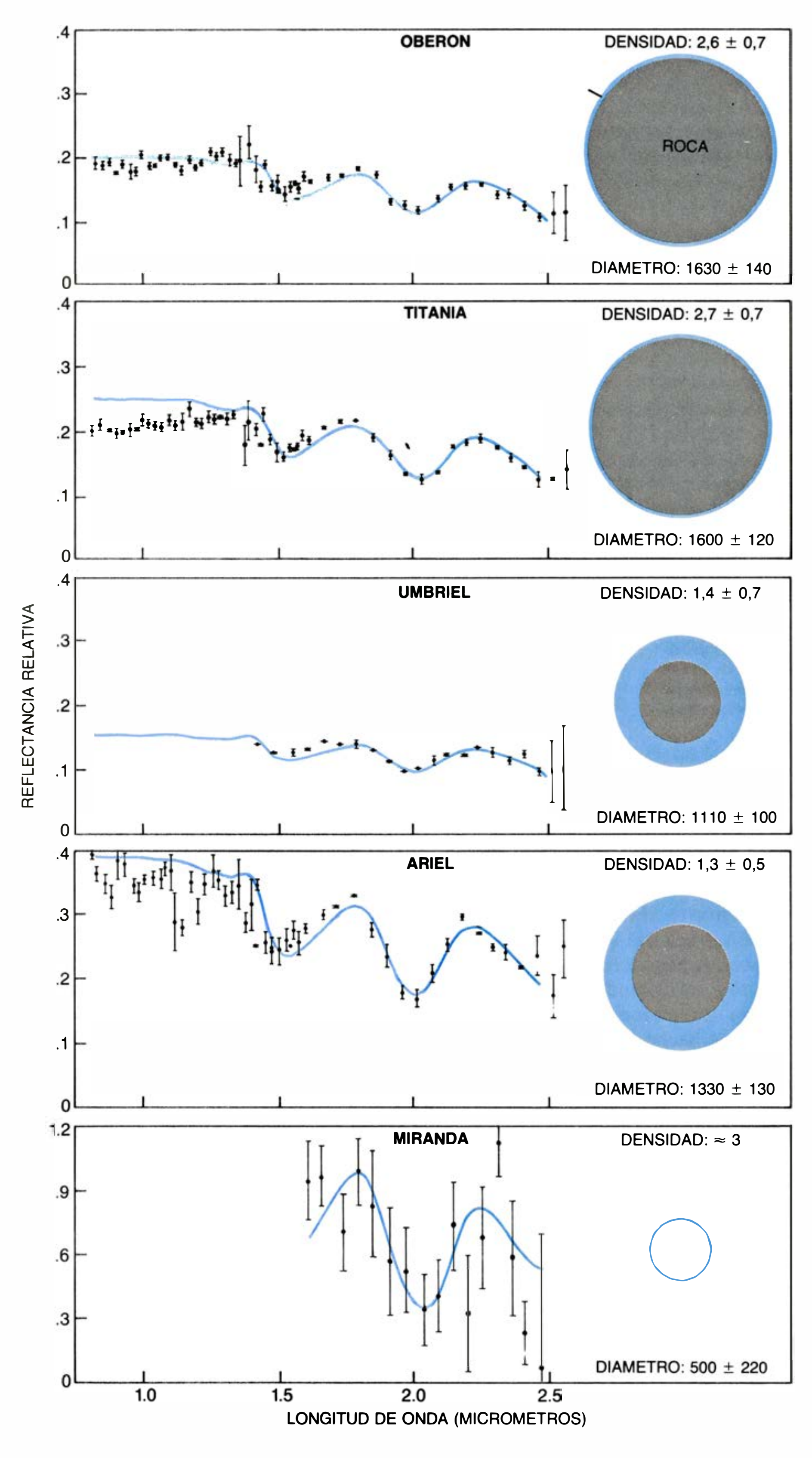
La ambigüedad puede deshacerse midiendo el flujo térmico del satélite, que depende también de su tamaño y reflectividad. La luz solar que no se refleja calienta la superficie del satélite y sale reemitida en forma de energía térmica a longitudes de onda mayores, en el infrarrojo (entre 20 y 100 micrometros en el caso de los satélites de Urano). Combinando las mediciones radiométricas del flujo infrarrojo de calor con las fotométricas del brillo, se puede construir, en principio, un sistema de dos ecuaciones cuyas dos incógnitas serán el diámetro del satélite y la reflectividad. (En la práctica, habrá que postular algunas hipótesis acerca de las propiedades radiativas del satélite. Por fortuna, éstas resultan ser muy sencillas para una superficie constituida por finos granos de hielo flojamente unidos en el seno del vacío, porque tal superficie no almacena ni conduce mucho calor.)

Calcular los diámetros de los satélites de Urano mediante la técnica fotoradiométrica ha demostrado, no obstante, ser una tarea difícil. La temperatura en la superficie de los satélites es sólo de 80 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto), y Urano nunca se acerca a menos de 2700 millones de kilómetros de la Tierra. Además, el vapor de agua en la atmósfera terrestre absorbe mucha de la radiación infrarroja incidente. En consecuencia, el flujo térmico de los satélites de Urano es casi indetectable, ni siquiera con los mejores telescopios infrarrojos; de hecho, Miranda no se puede detectar en absoluto.

Uno de los mejores telescopios infrarrojos existentes es la instalación de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) en la montaña hawaiana de Mauna Kea, que a una altitud de 4200 metros se beneficia de una atmósfera bastante seca. Trabajando allí en 1981 con David Morrison, de la Universidad de Hawai en Manoa, medimos el flujo térmico y calculamos el diámetro y la reflectividad de los cuatro satélites exteriores de Urano. Hallamos que eran mucho mayores y oscuros de lo que se había creído cuando se supuso que sus superficies eran de hielo de agua puro. Aunque notablemente menores que los cuatro satélites galileanos de Júpiter, que Titán de Saturno y que la Luna terrestre, se encuentran entre los mayores satélites del sistema solar.

¿Cuál es, pues, la sustancia que oscurece la superficie? Al principio estábamos intrigados por la ausencia, incluso en espectros de alta resolución más recientes, de bandas de absorción fuera de las atribuibles al agua helada. Pronto surgió una posible explicación: la sustancia oscura podría ser espectralmente neutra. En otras palabras, podría ser una materia incolora que reflejara escasa luz y absorbiera todas las longitudes de onda más o menos igualmente.

En experimentos de laboratorio hallamos que podíamos reproducir, con bastante aproximación, los espectros del satélite mediante espectros de hielo de agua finamente molido, o de escarcha, cubierto con manchas aisladas y distribuidas uniformemente de polvo de carbón vegetal. Los satélites tienen reflectividades diferentes; los modelos de superficie que mejor reproducen, pues, sus espectros difieren en sus respectivas proporciones de hielo y polvo de carbón. El carbón es un material de laboratorio cómodo; por venir de organismos vivientes, es probable que no se dé en los satélites de Urano. Pero también lo es que la sustancia oscura de la superficie de los satélites, lo mismo que el carbón, se muestre espectralmente neutra y refleje entre el 5 y el 15 por ciento de la luz incidente. Los materiales que se ajustan a esta descripción incluyen un óxido magnético del hierro llamado magnetita, varios silicatos minerales y un polímero orgánico oscuro que se encuentra en meteoritos carbonáceos primitivos.



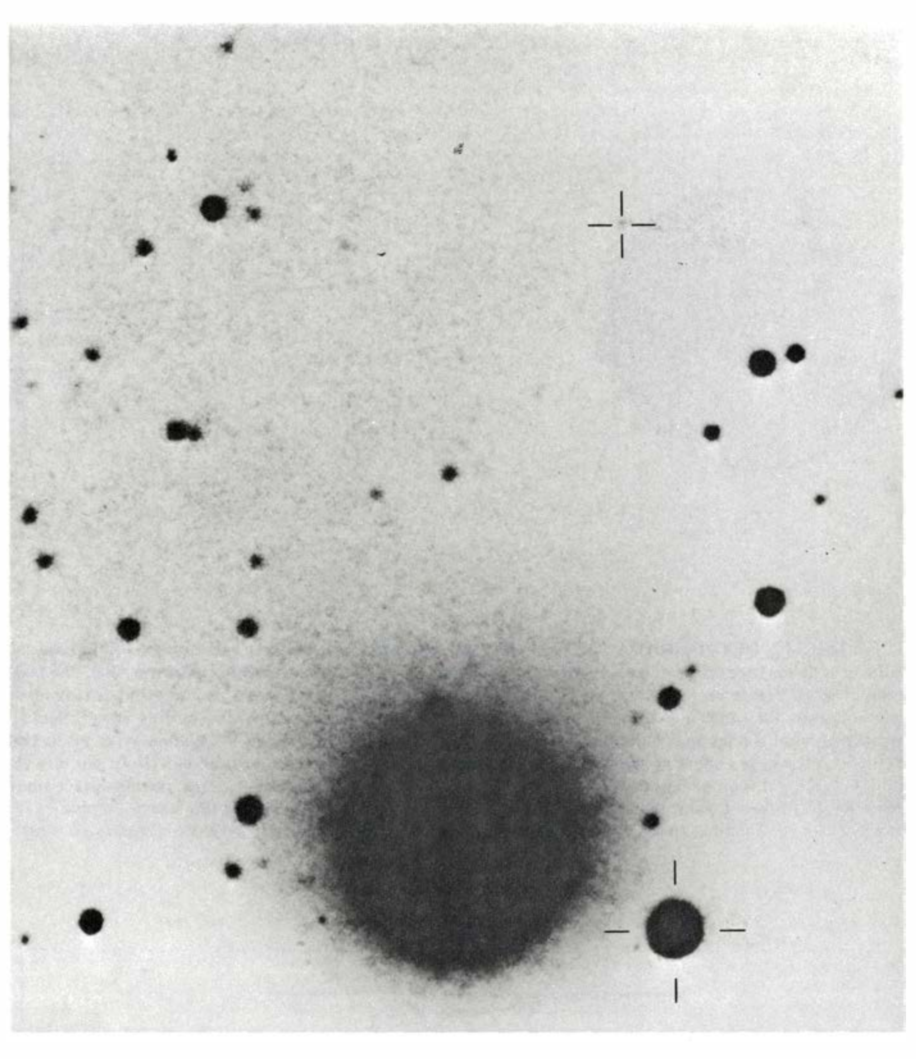
3. COMPOSICION DE LOS SATELITES DE URANO deducida de su espectro de reflexión en el infrarrojo próximo y de sus densidades medias. Los espectros de los cuatro satélites exteriores tienen profundas bandas de absorción a longitudes de onda entre 1,5 y 2,0 micrometros, características del hielo de agua. Los datos de Miranda son defectuosos (las líneas verticales muestran el margen de error), pero destaca una intensa banda de absorción a 2,0 micrometros. Los espectros de los satélites *(puntos)* se adaptan bien a los espectros de modelos de laboratorio en dos componentes *(líneas)* formados por escarcha de agua y polvo de carbón vegetal. Se cree que los satélites tienen una superficie helada y un núcleo rocoso, si bien las diferencias de densidad media (medida en gramos por centímetro cúbico) sugieren que Ariel y Umbriel tienen capas de hielo más espesas que Titania y Oberón. La densidad de Miranda es demasiado incierta para permitir obtener conclusiones acerca de su estructura propia interna. Los diámetros se dan en kilómetros. A título de comparación, recuérdese que la Luna terrestre mide 3480 kilómetros de diámetro.

Sin embargo, hay razones para creer que tales materiales rocosos podrían no explicar las manchas oscuras de los satélites de Urano. De acuerdo con ciertos trabajos teóricos de David J. Stevenson, del Caltech, los satélites alcanzarían un tamaño suficiente para haber experimentado diferenciación física. Durante este proceso, el calor de la desintegración de los elementos radiactivos en las rocas habría fundido el interior de los satélites, permitiendo que los materiales rocosos fueran a parar al núcleo. (La mayoría de los satélites menores, según se cree, no experimentan diferenciación porque el calor escapa de su interior antes de inducir la fusión.) Además, en opinión de Stevenson, la fusión podría haber ido acompañada de extensa actividad volcánica. El agua expulsada en las erupciones volcánicas habría recubierto la superficie con una capa de hielo casi puro de grano fino, tapando las rocas que hubieran quedado expuestas.

Steven W. Squyres, ahora en el Centro de Investigación Ames de la NASA, y Carl Sagan, de la Universidad de Cornell, han propuesto una explicación para el origen de la materia oscura, que concuerda con la diferenciación y con la salida ulterior a la superficie por erupciones volcánicas. En virtud de esa hipótesis, la luz ultravioleta del Sol descompondría el metano aprisionado en los cristales de hielo de agua en la superficie del satélite. El carbono e hidrógeno atómicos resultantes se recombinarían con metano para formar complejos polímeros hidrocarbonados cuyo color es rojo oscuro. Experimentos de laboratorio llevados a cabo por varios investigadores han confirmado que el hielo de metano o el hielo de agua contaminado de metano forma realmente polímeros carbonados oscuros —semejantes a los hallados en los meteoritos carbonáceos— cuando se les somete a radiación de alta energía. No se precisa que la radiación sea luz ultravioleta: el hielo se oscurece también en rayos gamma, como los que emergen del centro de la galaxia, o con partículas cargadas de alta energía, como las que hay en los cinturones de Van Allen producidos por el campo magnético terrestre.

Si buena parte del metano de la superficie de los satélites de Urano se hubiese convertido en materia oscura, esto explicaría por qué el metano no se ha observado todavía allí, aun cuando la mayoría de los modelos sobre formación del sistema solar predicen su presencia. Entra dentro de lo posible que

las intensas bandas de absorción del hielo de agua enmascaren los sellos espectrales del metano así como del amoníaco. Desgraciadamente, el *Voyager 2* no lleva ningún instrumento proyectado para recoger datos y pormenores relativos a la composición de la superficie de los satélites. Las imágenes transmitidas por la sonda proporcionarán alguna información nueva, pero la prueba concluyente de la existencia de metano y amoníaco, junto con la naturaleza del componente oscuro de la superficie, habrán de obtenerse mediante observaciones mejoradas que se realicen desde el suelo o por futuros vehículos espaciales. Cualquiera que sea la composición de la sustancia oscura, pequeñas partículas de ella pueden también constituir los nueve estrechos anillos de Urano: los anillos son espectralmente neutros y su reflectividad es todavía inferior a la que muestran las manchas oscuras de los satélites.



4. DOS SATELITES DE NEPTUNO son Tritón y Nereida *(cruces)*. Tritón, el mayor satélite interior, viene a alcanzar el tamaño de la Luna terrestre. (En la fotografía aparece mucho mayor de lo que realmente es.) Nereida tiene probablemente un diámetro de entre 150 y 525 kilómetros. La fotografía fue realizada por el astrónomo Christian Veillet con el telescopio Canadá-Francia-Hawai en Mauna Kea.

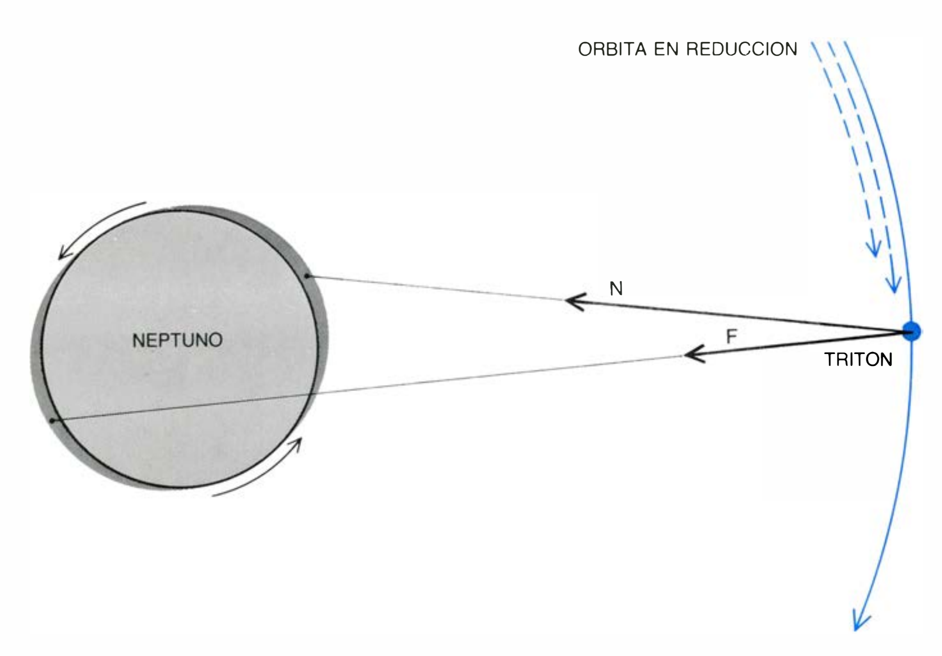
Para entender el origen y evolución de los satélites de Urano, la información sobre su composición global adquiere una importancia mayor que el mismo conocimiento de las propiedades de sus superficies. El indicador más útil de la composición global de un objeto astronómico reside en su densidad media, que se calcula a partir de la masa y el diámetro. Christian Veillet, del Centro de Estudios e Investigaciones Geodinámicas y Astronómicas de Grasse, Francia, acaba de realizar las primeras estimaciones fiables de las masas de los satélites de Urano refinando mediciones anteriores de sus órbitas.

Usando los valores que nosotros obtuvimos de los diámetros de los cuatro satélites exteriores, Veillet dedujo que Ariel y Umbriel tenían unas densidades aproximadas de 1,3 y 1,4 gramos por centímetro cúbico respectivamente, en tanto que las densidades de Titania y Oberón tendían a doblarlas. (La cifra comparable para la Tierra es de 5,5 gramos por centímetro cúbico.) Ariel y Umbriel se acercan, en su densidad, a la de muchos de los helados satélites de Saturno; de lo que se infiere que su composición global puede ser similar. Una mezcla constituida por 55 por ciento en peso de hielo de agua, cuya densidad media es de 0,9 gramos por centímetro cúbico, y 45 por ciento de materia rocosa, 3,0 gramos por centímetro cúbico de densidad, da un valor global correcto para la densidad. Del mismo razonamiento se deduce que Titania y Oberón consistirían en una mezcla de 95 por ciento de materia rocosa y 5 por ciento de agua helada. Admitiendo que la fusión ha hecho que la roca se sedimente en el núcleo, los dos satélites exteriores de Urano serían esferas rocosas cubiertas de finas capas de hielo. Ariel y Umbriel tendrían núcleos rocosos menores y capas de hielo mucho más espesas.

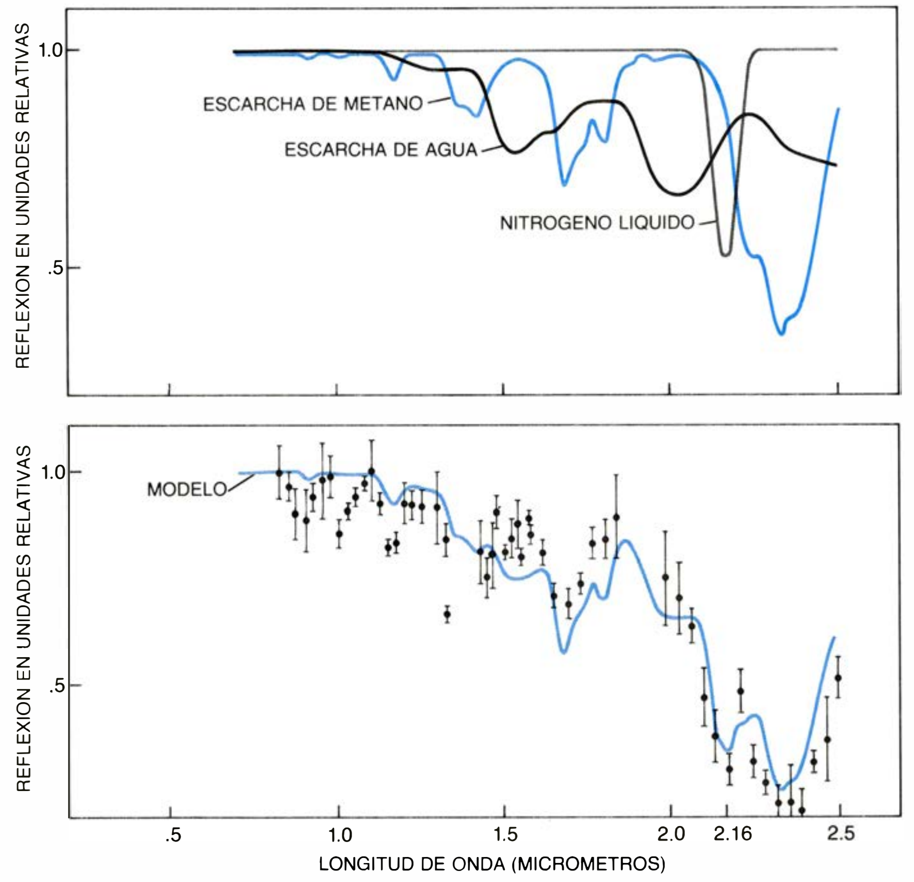
Si esto es verdad, la conclusión resultaría un tanto sorprendente. Si los satélites se formaron al mismo tiempo que el propio Urano, el calor liberado por la agregación de granos interestelares y la contracción gravitatoria del protoplaneta debería haber producido una mayor cantidad de materia pesada, condensándose en la vecindad del planeta. Ariel y Umbriel mostrarían, así, una proporción más alta de roca y una menor de materias volátiles que Titania y Oberón. Los descubrimientos de Veillet, que apuntan en sentido contrario, podrían tomarse como indicación de la hipótesis, avanzada por algunos investigadores, de que los satélites de Urano se formarían después, en virtud del mismo impacto catastrófico que se supone ladeó al planeta. Sin embargo, los actuales modelos de la estructura interna de los satélites deben considerarse con escepticismo, porque los cálculos de densidades sobre los cuales descansan carecen en muchos puntos de base sólida.

La principal fuente de duda se refiere a la medición del diámetro, por lo que la situación podría mejorar sustancialmente cuando el *Voyager 2* llegue a Urano en enero. Las imágenes transmitidas por su cámara de alta resolución permitirán determinar con gran exactitud el diámetro de los cinco satélites. Pequeñas desviaciones en la trayectoria del vehículo espacial provocadas por la atracción gravitatoria de Miranda posibilitarán calcular, asimismo, con gran exactitud la masa de este satélite.

No menos importante: las cámaras del Voyager nos ofrecerán la morfología de los satélites. El vehículo espacial pasará a 29.000 kilómetros de Miranda y a 127.000 kilómetros de Ariel. Las



5. LA ORBITA RETROGRADA DE TRITON está reduciéndose en forma casi imperceptible bajo la influencia de las fuerzas de marea. A medida que Tritón se mueve en una órbita circular a unos 350.000 kilómetros de Neptuno, su campo gravitatorio deforma el planeta haciéndolo más elipsoidal. (Los dos cuerpos están dibujados a escala uno respecto al otro, pero la distancia entre ellos es desproporcionadamente pequeña; el tamaño del abultamiento debido a la marea se ha exagerado.) El planeta no es perfectamente elástico y gira sobre sí mismo en sentido opuesto al del movimiento orbital de Tritón; por ello el abultamiento del lado próximo está siempre ligeramente detrás del satélite. Su gravitación ejerce una atracción (*N*) sobre Tritón, provocando que el satélite vaya poco a poco perdiendo altura. Menor es la fuerza *F* sobre el abultamiento más lejano. Según parece, Tritón sobrevivirá 10.000 millones de años.



6. ESPECTRO DE REFLEXION DE TRITON en el infrarrojo próximo *(abajo)*. Sugiere que su superficie consta, sobre todo, de hielo de metano y nitrógeno líquido. La mayor parte de las bandas de absorción (mínimos de reflexión) coinciden con las bandas que se hallan en el espectro de las escarchas de metano de grano fino. La banda a 2,16 micrometros no coincide, pero es prominente en el espectro del nitrógeno. El modelo de mejor ajuste es el de una superposición de esos dos espectros con el de escarcha de agua.

imágenes de esos dos satélites deberían revelar aquellos accidentes de la superficie que se extiendan hasta dos kilómetros de anchura. El ángulo de incidencia de la sonda y su alta velocidad —unas 10 veces la de una bala de fusil— sólo dejará tomar vistas en detalle de una pequeña fracción de la superficie del satélite. Pero las imágenes mostrarán probablemente las manchas de materia clara y oscura. También deberían manifestarnos hasta qué punto las superficies de los satélites de Urano se hallan craterizadas por acción de meteoritos y recubiertas por nuevo hielo procedente de la superficie inferior.

Los estudios teóricos ponen de relieve que la actividad volcánica y la creación de nueva superficie acontecieron, quizás, en un pasado geológicamente reciente de Ariel y Miranda. Ambos son apreciablemente más reflectores que sus compañeros, lo que indica que podrían hallarse cubiertos de depósitos de hielo nuevo relativamente extensos y no oscurecidos. Las imágenes del Voyager pueden revelar ríos de lava volcánica. Si tenemos suerte, podrían incluso registrar erupciones en plena efervescencia, como lo hicieron a propósito del satélite Io de Júpiter.

Tres años y medio más tarde, y alejado del lugar más de 1500 millones de kilómetros, el *Voyager 2* se acercará a Neptuno y su gran satélite Tritón. El vehículo no pasará cerca de Nereida, el otro satélite de Neptuno, que está en una órbita altamente inclinada que lo lleva a más de nueve millones de kilómetros del planeta. Casi nada sabemos de las propiedades físicas de Nereida, tal es su debilidad. Partiendo de su luminosidad, se le atribuye un diámetro entre 150 y 525 kilómetros, comparable con el de los mayores asteroides.

Tritón gira en una órbita circular a aproximadamente 350.000 kilómetros de Neptuno; de tamaño parejo al de la Luna terrestre, mide 3480 kilómetros de diámetro. La órbita de Tritón, que casi coincide con el plano orbital de Neptuno, está inclinada unos 28 grados con respecto al plano ecuatorial del planeta. Es retrógrado: el satélite gira alrededor de Neptuno en sentido opuesto al de la rotación del planeta. Una órbita retrógrada se reduce lentamente, porque el abultamiento debido a la marea que el satélite causa en el planeta se mueve en sentido contrario por efecto de la rotación de éste; el abultamiento ejerce una atracción gravitatoria sobre el satélite desde atrás, retardándolo *[véase la figura 5]*. Los primeros cálculos predecían la desaparición

de Tritón en menos de 100 millones de años, pero un estudio más reciente realizado por Alan W. Harris, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, indica que la reducción orbital es extremadamente lenta, y que Tritón sobrevivirá durante unos 10.000 millones de años.

Neptuno y sus satélites se encuentran a una vez y media la distancia que separa el Sol de Urano; la región de la nebulosa solar donde se formaron estaba probablemente más fría. Cabe esperar, pues, que la química de Tritón difiera algo de la característica de los satélites de Urano. Por otro lado, antes de que hubiera datos disponibles se esperaba que el espectro en el infrarrojo próximo de Tritón mostrase la presencia de hielo de agua muy frío. La ausencia de esta marca fue una sorpresa inesperada del primer espectro, tosco, de Tritón obtenido en 1978 por uno de nosotros (Cruikshank) y Peter M. Silvaggio, a la sazón en el Centro de Investigación Ames. No menos llamativa resultó ser la presencia de una intensa banda de absorción a la longitud de onda de 2,3 micrometros, característica del metano. Este trabajo mostró que quizá no fuera el agua la materia volátil dominante en la superficie de los objetos situados en el borde del sistema solar. La región de la nebulosa solar donde se formó Neptuno parece haber sido muy distinta, en temperatura y composición, de la región próxima a Urano.

El descubrimiento de metano en Tritón creó otra emocionante perspectiva: Tritón debía tener atmósfera. El metano es más volátil que el agua; en otras palabras, la presión de vapor del hielo de metano a una temperatura dada —su tendencia a sublimarse en forma de gas— es mayor que la del agua helada. A las bajas temperaturas dominantes cerca de Urano y Neptuno, es casi imposible que se sublime el hielo de agua, pero el hielo de metano lo hace fácilmente. Aunque las bandas de absorción del espectro de Tritón podría haberlas producido cualquiera de las formas sólida o gaseosa del metano, ambas están probablemente presentes en el satélite; la presencia de una suele implicar la de la otra.

Creemos que Tritón puede tener también un océano. Colaborando con Clark en 1981, obtuvimos espectros mejorados que revelaron otra importante característica: una banda de absorción a 2,16 micrometros, que no cabía atribuir al metano o a cualquier hidrocarburo próximo al mismo. De momento, asignamos esta banda al nitrógeno molecular. El nitrógeno ordinario no absorbe en el infrarrojo próximo, pero la interacción de moléculas de nitrógeno bajo alta presión sí produce una débil absorción. Para originar el intenso rasgo espectral que hemos observado, el nitrógeno de Tritón debería hallarse sometido a una presión muy alta; dada la baja temperatura de la superficie del satélite, el gas se habría condensado en forma líquida o sólida.

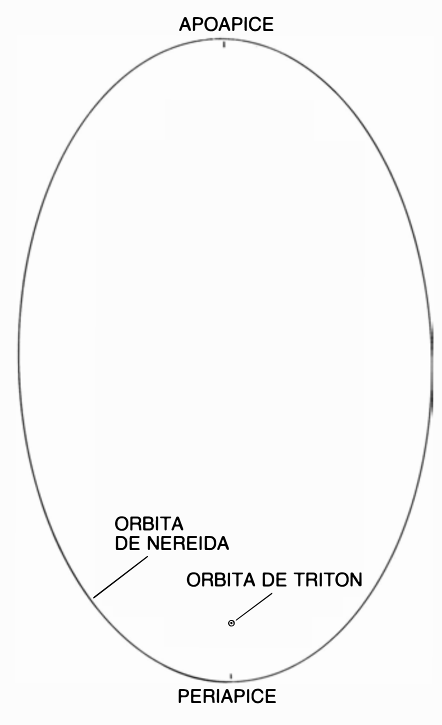
Así interpretamos nosotros esos datos: una importante fracción de Tritón estaría cubierta de nitrógeno líquido con una profundidad de varias decenas de centímetros, y quizá mucho mayor. La abundancia de nitrógeno parece superar, de lejos, la de metano. Una pequeña cantidad de metano puede estar disuelta en nitrógeno, pero los datos indican que hay bloques de hielo de metano en otras partes de la superficie.

Queremos subrayar que la identificación del nitrógeno en Tritón es provisional. De haber nitrógeno, no tendría por qué hallarse en forma líquida: Jonathan I. Lunine, de la Universidad de Arizona, y Stevenson han propuesto, basándose en razones teóricas, que puede estar congelado en forma sólida. Estudios ulteriores desde el suelo junto con los datos del *Voyager 2* podrían ayudar a resolver la cuestión.

En virtud de la presión de vapor del nitrógeno, alta, su presencia en Tritón implicaría que el satélite goza de una notable atmósfera de nitrógeno; la presión atmosférica en la superficie estaría entre el 10 y el 30 por ciento de la que se mide en la Tierra. Esta y el satélite de Saturno Titán son los únicos objetos de tamaño planetario del sistema solar en los que se reconoce una atmósfera compuesta principalmente de nitrógeno. (Si la Tierra se trasladase a la posición de Tritón, la baja temperatura haría que su atmósfera se condensase formando un mar líquido de unos 15 metros de profundidad.) Una atmósfera de nitrógeno en Tritón revistiría, por consiguiente, especial interés para los planetólogos. En particular, tendría relación con el problema del origen del nitrógeno en el sistema solar: si surgió como sustancia pura en la nebulosa solar o si procede de la fotodisociación del amoníaco en nitrógeno e hidrógeno. Se supone que el amoníaco abundó en la nebulosa porque había mucho hidrógeno.

El hielo sólido, una atmósfera y un océano en Tritón interactuarían entre sí en forma de ciclos diurnos y estacionales, como lo hacen en la Tierra. Cabe, al menos, presumirlo. Como resultado de la inclinación de su eje de rotación, Tritón está sometido a estaciones extremas. En la actualidad, su polo Sur queda en oscuridad permanente y su polo Norte recibe luz continuamente. Dentro de 82 años, cuando Neptuno esté al otro lado del Sol, la situación se invertirá. Laurence M. Trafton, de la Universidad de Texas en Austin, ha postulado que la abundancia atmosférica de metano en una región particular de Tritón varía de acuerdo con la estación, aumentando durante el verano a medida que el hielo de metano se sublima y decreciendo durante el invierno, cuando el gas metano se congela. Análogamente, el nitrógeno líquido se congelaría en forma sólida en la región polar oscura. Si el mar de nitrógeno es muy poco profundo, puede incluso congelarse a latitudes más bajas de la noche al día, en sincronismo con el período de rotación de Tritón de 5877 días terrestres.

Otra importante propiedad que Tritón podría compartir con la Tierra, así como con Titán, es una complicada química orgánica. Metano y nitrógeno son incoloros; pese a ello, el color de Tritón en el dominio de la luz visible es rojizo. Evidentemente habrá un componente químico adicional en la superficie de Tritón. El componente rojo pueden producirlo procesos químicos orgánicos del estilo de los propuestos para justifi-



7. ORBITA DE NEREIDA: una elipse excéntrica. En su punto de máxima proximidad (periápice), se halla a 1,3 millones de kilómetros de Neptuno; en el apoápice está a 9,7 millones de kilómetros del mismo. La inusual órbita de Nereida induce a pensar que quizá la capturó la gravedad de Neptuno.

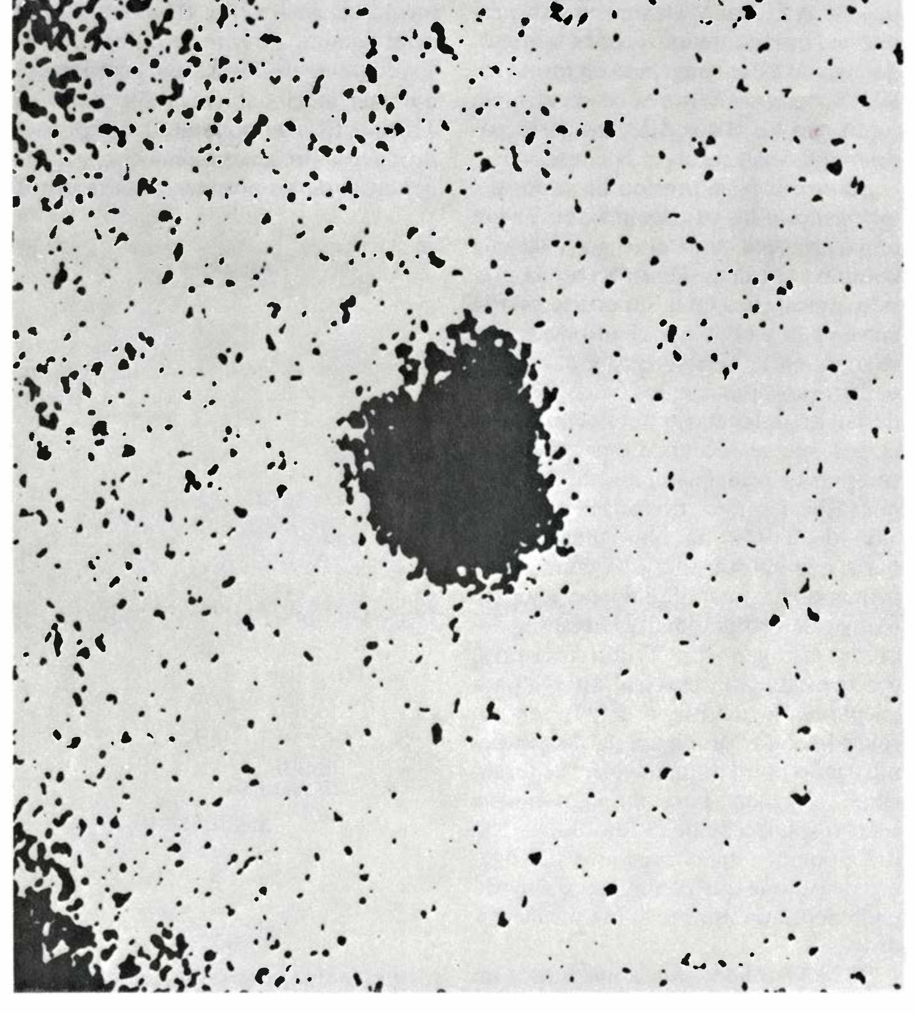
car las manchas oscuras de los satélites de Urano. Sagan y Bishun N. Khare, de la Universidad de Cornell, han mostrado que la irradiación ultravioleta de varias mezclas de gas metano con amoníaco, vapor de agua y otras sustancias produce polímeros hidrocarbonados rojizos. Complejos similares se forman, según M.L. Delitsky, de la empresa Calgon, cuando se bombardea metano disuelto en nitrógeno con partículas cargadas. El *Voyager 2* debe determinar si Neptuno está rodeado de cinturones de Van Allen que constituyan la fuente de tales partículas.

El vehículo espacial conseguirá bastante más. Cinco horas después de pasar por el punto de máxima proximidad a Neptuno, el día 24 de agosto de 1989, transitará a menos de 10.000 kilómetros de Tritón. De gran parte de cuya superficie transmitirá imágenes a una resolución de pocos cientos de metros —más alta que la alcanzada en cualquier otra pasada anterior, excepto la misión *Mariner 10* a Mercurio y las misiones *Apolo* a la Luna. Podremos contemplar, tal vez, bloques de hielo de metano y el reflejo de la luz del Sol sobre el mar de nitrógeno; podremos distinguir el contorno de un gigantesco cráter meteorítico en gran parte borrado por las intensas variaciones estacionales del tiempo en Tritón. Además, los espectrómetros ultravioleta e infrarojo del *Voyager 2* determinarán las abundancias atmosféricas de metano, nitrógeno y otros gases, con lo que se podrán poner a prueba los burdos modelos de la superficie y atmósfera del satélite.

Al mismo tiempo, el vehículo espacial añadirá solidez a los estudios de las propiedades internas de Tritón, aportando las primeras mediciones fidedignas de su masa y diámetro. Medidas radiométricas recientes, realizadas por nosotros y otros autores, establecen el diámetro del satélite en unos 3500 kilómetros. No obstante, esta estima puede tener un error de hasta un 40 por ciento, porque se basa en la hipótesis simplificadora de que la energía solar absorbida por Tritón se reemite inmediatamente en forma de calor. Un océano grande y volátil y una atmósfera podrían, con toda verosimilitud, almacenar y redistribuir una cantidad importante de calor, dejando la hipótesis en entredicho.

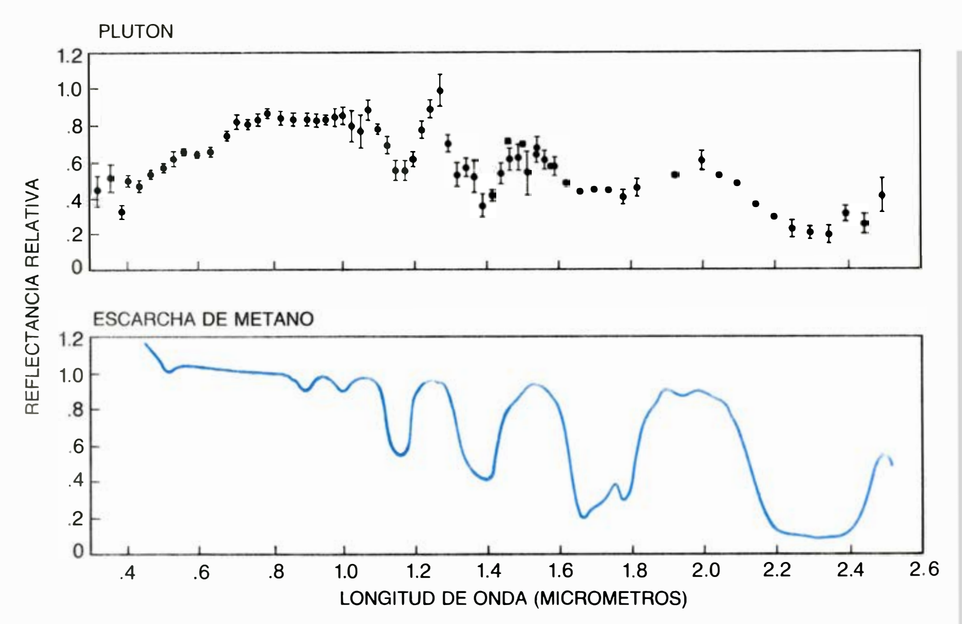
Los intentos acometidos por medir la masa de Tritón desde la Tierra se tornan difíciles: Nereida, otro satélite de Neptuno, está demasiado lejos para que su órbita quede afectada de forma determinable por el campo gravitatorio de aquél. Consiguientemente, los investigadores se han visto obligados a estimar la masa de Tritón a partir del casi imperceptible bamboleo que induce en la órbita de Neptuno. Combinadas con las recientes medidas del diámetro, tales estimas de la masa conducen a un valor de unos ocho gramos por centímetro cúbico para la densidad media de Tritón, superior a la de todos los planetas. Este implausible resultado implicaría que Tritón está constituido, sobre todo, por hierro u otros metales, que no es lo que cabría esperar del sistema solar exterior. Las cifras precisas de masa y diámetro deducidas de los datos del *Voyager 2* podrían resolver el problema.

Por último, el vehículo espacial puede decidir la cuestión de si el sistema neptuniano tiene un tercer satélite o incluso un anillo. Mientras atendían a la ocultación de una estrella distante por Neptuno en 1981, Harold J. Reitsema y sus colegas, de la Universidad de Arizona, observaron que la estrella se debilitaba varios minutos antes de que Neptuno pasara frente a la misma. Los investigadores han sugerido que la ocultaba un satélite hasta entonces desconocido, tan próximo a Neptuno que su imagen se perdería en el resplandor del planeta. William B. Hubbard, también de Arizona, cree, por contra, que las observaciones de ocultación de Reitsema y las de otros investigadores se explican mejor suponiendo la existencia de un anillo discontinuo en torno a Neptuno. Si se demuestra que Hubbard tiene razón, quizás haya de alterarse el rumbo del *Voyager 2:* su trayectoria actual lo haría pasar justamente por medio del anillo.



8. CARONTE, el satélite de Plutón, apenas es discernible como un abultamiento en la imagen del planeta; aquí se ve en su parte superior derecha. Caronte dista unos 20.000 kilómetros de Plutón, con un tamaño entre el tercio y la mitad del del planeta. La imagen fue tomada por James W. Christy y Robert S. Harrington, del Observatorio Naval de los Estados Unidos, quienes descubrieron el satélite en 1978.

La sonda no pasará próxima a Plutón, ni lo hará ninguna otra en un futuro previsible. Pero vale la pena de-



9. ESPECTRO DE PLUTON en el dominio del infrarrojo próximo; muestra al menos cuatro bandas de absorción características de la escarcha de metano. Sin embargo, la forma e intensidad de las bandas no coinciden con las del espectro del metano, lo que indica que Plutón tiene otro componente superficial. En el dominio visible (longitudes de onda entre 0,3 y 0,7 micrometros) se encuentra una nueva razón de discrepancia: Plutón presenta un color rojizo a causa de reflejar más luz roja que azul. El componente rojo puede deberse quizás a complejos hidrocarbonados que deriven de la fotodisociación del metano.

tenernos en Plutón. Aunque se trata de un planeta de órbita centrada en el Sol y acompañado de su propio satélite, Plutón es comparable en tamaño a Tritón. Hoy se encuentra casi a la misma distancia del Sol que aquél, porque su órbita elíptica lo ha situado temporalmente dentro de la propia de Neptuno. Las lecciones que se saquen de los encuentros del Voyager con Neptuno y Urano ahondarán nuestro conocimiento de Plutón, así como de Caronte, su satélite.

Medio siglo después de su descubrimiento, en 1930, lo único que se sabía de Plutón, aparte de sus parámetros orbitales, era que su brillo variaba con un período de 6,4 días; la variación se atribuye a la rotación del planeta. En 1976, uno de nosotros (Cruikshank), colaborando con David Morrison y Carl B. Pilcher, de la Universidad de Hawai, hallaron indicaciones espectrométricas de que gran parte de la superficie del planeta se cubría de hielo de metano. La alta reflectividad que este hallazgo implica sugirió que era algo más pequeño y de menor masa que lo que se había creído.

Cuando James W. Christy y Robert S. Harrington, del Observatorio Naval de los Estados Unidos, descubrieron Caronte en 1978, se abrió el camino para calcular la masa de Plutón. Los resultados apoyaban la hipótesis de que el planeta no era mayor que la Luna terrestre y se componía predominantemente de materias volátiles. Resulta difícil observar Caronte separado de Plutón —es un mero apéndice de la imagen del planeta—, razón por la cual se sigue ignorando su tamaño y masa; aquél vendrá a ser, probablemente, entre una tercera y una quinta parte del tamaño de Plutón. Quizá tenga una masa considerable en relación a la que alcanza el planeta, porque su período orbital es el mismo que el período de rotación de Plutón: los dos cuerpos muestran siempre la misma cara uno frente al otro. Tal sincronismo sólo puede darse cuando la masa del satélite es superior a aproximadamente el 5 por ciento de la masa del planeta. (A título de comparación, la masa de nuestra Luna no llega al 2 por ciento de la masa terrestre: presenta siempre la misma cara hacia la Tierra, sin que la rotación de ésta quede perturbada).

Caronte tiene una órbita circular orientada en dirección Norte-Sur, casi perpendicular al plano orbital de Plutón. Sugiere esto que el plano ecuatorial del planeta es también aproximadamente perpendicular a su plano orbital, propiedad que antes se creyó era exclusiva de Urano. A principios de este año, Edward F. Tedesco, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, Richard P. Binzel, de la Universidad de Texas en Austin, y David J. Tholen, de la Universidad de Hawai, detectaron eclipses de Plutón (y ocultaciones de Caronte). Los eclipses se observan sólo cuando el plano orbital de Caronte apunta hacia la Tierra, lo que ocurre dos veces en los

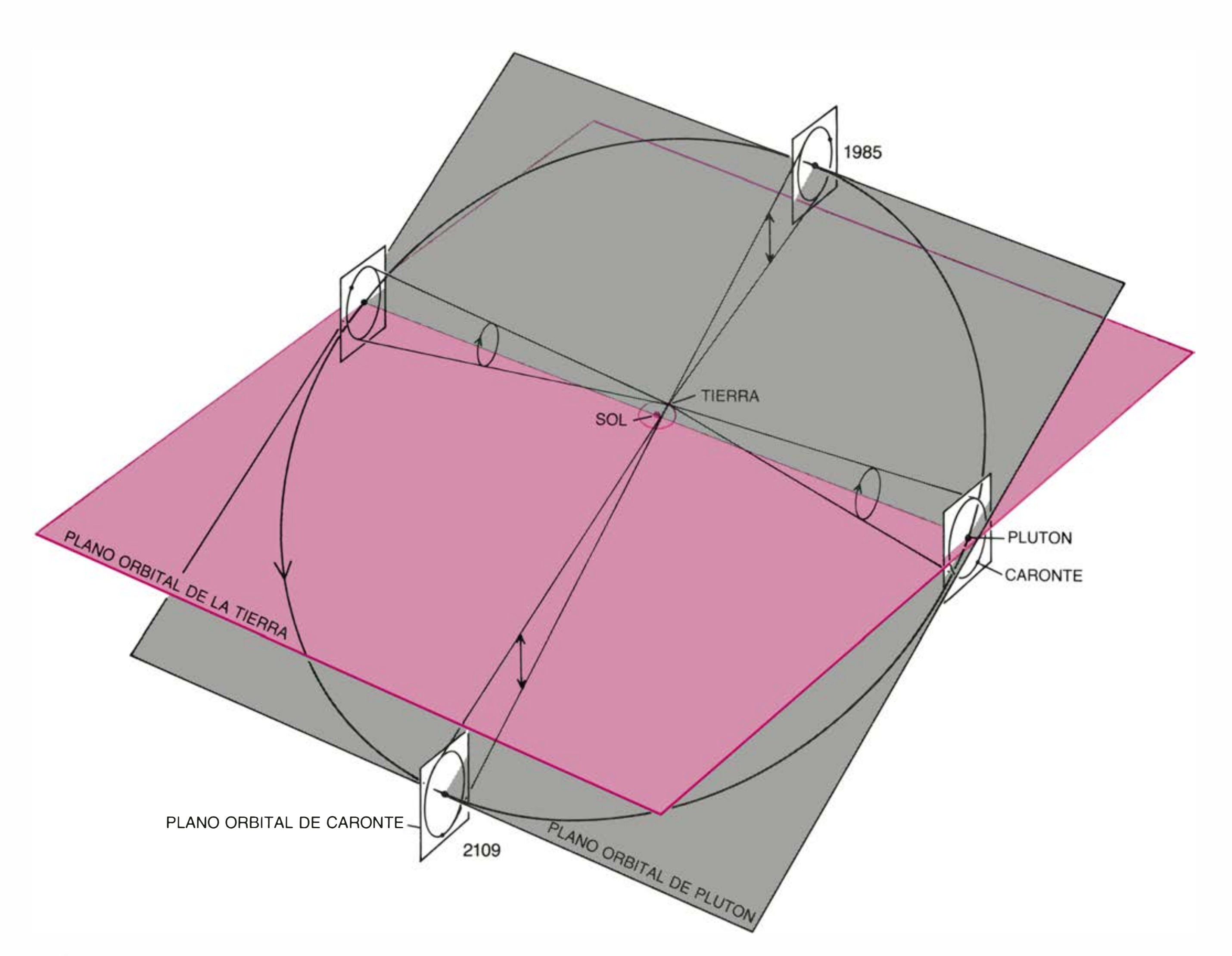
248 años que tarda Plutón en describir su órbita. Las observaciones de la actual serie de eclipses durante los próximos años deberán aportar mediciones mejoradas de las dimensiones de ambos astros. Es incluso posible que se llegue a determinar si tienen reflectividades similares y por tanto composiciones superficiales parecidas.

La superficie de Plutón, dominada por hielo de metano, debe tener también otros componentes. La intensidad de la absorción de las bandas de metano varía de una región a otra. Al parecer, las variaciones están asociadas con el cambio de brillo total del planeta: las regiones brillantes parecen ser las que presentan mayor cobertura de hielo de metano. En las regiones oscuras, el metano está recubierto por un material de composición desconocida. Ese material oscuro resultaría quizá de la fotolisis del metano.

La presencia de hielo de metano en Plutón implica, como ocurre con Tritón, la existencia de una tenue atmósfera de ese gas: Uwe Fink y Marc W. Buie, de la Universidad de Arizona, han comprobado la presencia de gas metano por medio de medidas espectrales de alta resolución. ¿Podría Plutón tener un mar de nitrógeno? Con los datos actuales es imposible aseverarlo, porque incluso con espectros de alta resolución las intensas bandas del metano enmascaran la región donde aparecería una banda de nitrógeno. Sin embargo, en tamaño y composición de la superficie, Tritón y Plutón parecen llamativamente semejantes y distintos de los satélites de Urano, menores y dominados por el agua.

La relación entre Plutón y el sistema neptuniano es uno de los misterios persistentes del sistema solar. Durante mucho tiempo se le consideró un satélite escapado de Neptuno, si bien nunca se estableció el mecanismo que pudiera explicar su paso a una órbita planetaria. William B. McKinnon, de la Universidad de Washington, acaba de calcular que Plutón y Caronte no podrían haber sobrevivido a un escape de Neptuno sin desintegrarse. Por otra parte, la peculiar órbita retrógrada de Tritón sugiere que quizá no haya surgido del sistema neptuniano. Como hace notar McKinnon, la hipótesis más sencilla es que tanto Plutón como Tritón se condensaron en forma planetaria en aproximadamente la misma región del sistema solar —de aquí su semejanza química— y que Tritón fue capturado por el campo gravitatorio de Neptuno.

La hipótesis más sencilla no tiene por qué ser la correcta, evidentemente. La misteriosa procedencia de Plutón y Tritón es otro de los problemas que el *Voyager 2,* junto con un uso imaginativo de los telescopios en la Tierra, tal vez resuelvan.



10. ECLIPSES DE PLUTON por Caronte. Desde la Tierra sólo pueden observarse durante dos breves fases de la órbita de Plutón, que dura 248 años; tales observaciones se hicieron por primera vez a principios de este año. La órbita de Caronte es casi perpendicular al plano orbital de Plutón *(gris)* y a la de la Tierra *(color)*. Cerca de los puntos en los que Plutón está a su máxima proximidad y a su máximo alejamiento del Sol, el plano orbital de Caronte contiene al Sol y la Tierra. Los eclipses se producen cuando el satélite pasa por delante de Plutón; las ocultaciones, cuando pasa por detrás. Ambos sucesos producen un descenso ligero, aunque mensurable, de la luminosidad total del sistema. Esta serie de sucesos seguirá produciéndose varios años más.

Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo

¿Qué restricciones gobiernan los procesos físicos de cómputo? ¿Exige cada paso lógico una cuota mínima de energía? Aunque no parece ser ello así, permanecen abiertas otras interrogantes

Charles H. Bennett y Rolf Landauer

Todos los procesos de cómputo, se realicen mediante maquinaria electrónica, con ábacos o por un sistema biológico, como el cerebro, son procesos físicos. Están sometidos a las mismas cuestiones aplicables a los demás procesos físicos: ¿Cuánta energía se requiere para efectuar un cómputo determinado? ¿Cuánto se tardará en realizarlo? ¿Qué tamaño ha de tener el dispositivo de cómputo? Con otras palabras, ¿cuáles son las limitaciones de carácter físico a que se hallan sujetos los procesos de cómputo?

Hasta el momento ha sido más fácil plantear estas preguntas que responderlas. En la medida en que hemos encontrado topes, éstos se hallan terriblemente alejados de los límites reales de la tecnología moderna. No podemos, así pues, profesar de guías para tecnólogos e ingenieros. Lo que en realidad estamos haciendo es de carácter más fundamental. Buscamos las leyes generales a que ha de someterse todo procesamiento de información, con independencia de cómo se lleve a cabo. Cualesquiera limitaciones que puedan hallarse habrán de basarse exclusivamente en principios físicos fundamentales, y no en ninguna de las tecnologías que en la actualidad podamos estar utilizando.

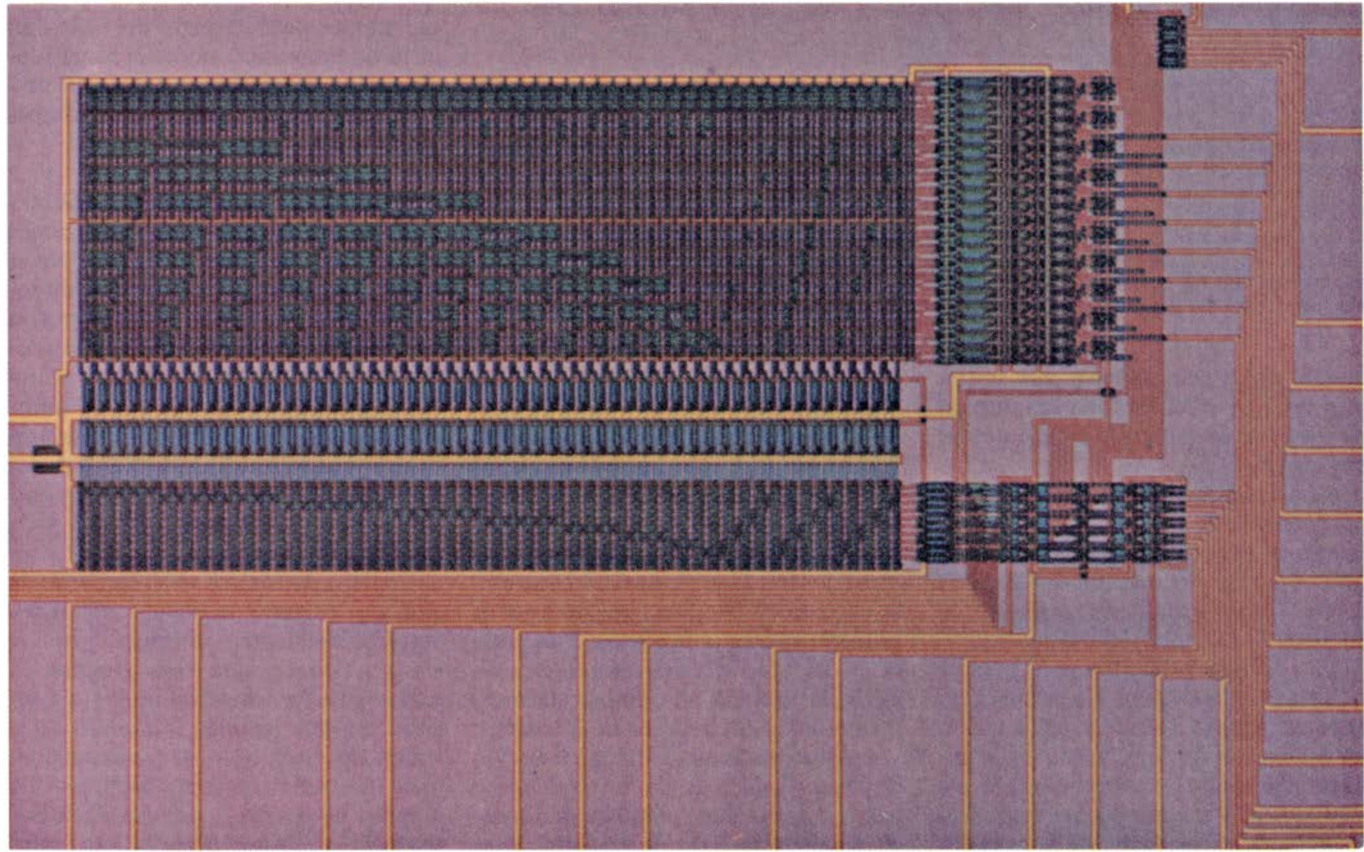
No faltan precedentes para esta clase de examen de principios. En el decenio de 1940, Claude E. Shannon, de los laboratorios Bell Telephone, descubrió que había limitaciones para la cantidad de información transmisible a través de un canal ruidoso. Tales limitaciones no dependían de cómo se codificara el mensaje en una señal portadora. El trabajo de Shannon señala el nacimiento de la moderna ciencia de la información. Anteriormente, a mediados y a finales del siglo pasado, los físicos habían creado la ciencia de la termodinámica, tratando de determinar los principios fundamentales que limitaban el rendimiento de las máquinas de vapor. Hacia 1960, uno de los autores (Landauer) y Jon Swanson, ambos de IBM, dieron los primeros pasos, al pretender aplicar un análisis del mismo tipo a los procesos de cómputo. Desde mediados del decenio pasado, ha comenzado a trabajar en este campo un creciente número de investigadores de otras instituciones.

En nuestro análisis de las limitaciones físicas de los procesos de cómputo utilizamos el término "información" en el sentido técnico que se le da en teoría de información. En ese contexto, se dice que se destruye información siempre que dos situaciones anteriormente distinguibles pasan a ser indistinguibles. En sistemas físicos ideales, carentes de rozamientos y fricciones, la información jamás puede destruirse. Siempre que se destruye información, es preciso disipar (esto es, convertir en calor) cierta cantidad de energía. A modo de ejemplo, imaginemos dos situaciones fáciles de distinguir, como las definidas por una pelota de goma mantenida, sea a dos metros sobre el suelo, sea a uno. Al dejarla caer, rebotará. Si no hubiera fricción, y si el suelo y la pelota fuesen perfectamente elásticos, un observador podría siempre determinar cuál era el estado inicial de la pelota (es decir, la altura desde la que inicialmente cayó), porque una pelota dejada caer desde dos metros rebotaría siempre más alto que otra arrojada desde un metro.

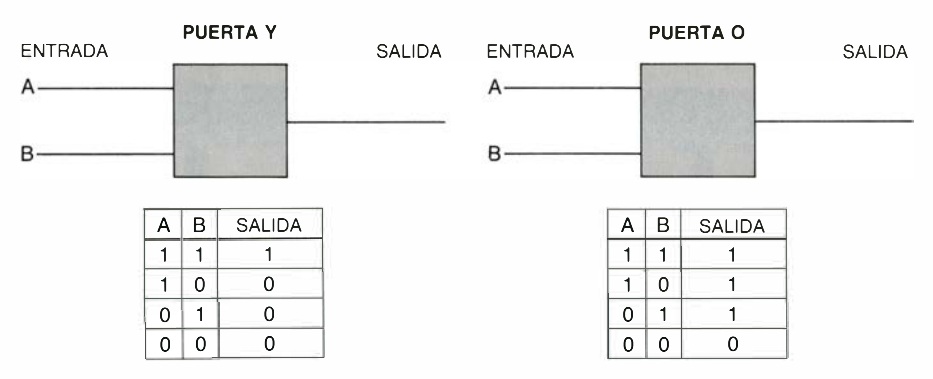
Sin embargo, si hay rozamiento y el choque no es perfectamente elástico, la pelota disipará en cada rebote una pequeña cantidad de energía, hasta que deje de botar y queda en reposo, en el suelo. Sería entonces imposible determinar cuál fue su estado inicial; la pelota que cayera desde dos metros sería indistinguible de otra que lo hiciera desde uno. Como resultado de la disipación de energía se habrá producido una pérdida de información.

Veamos otro ejemplo de destrucción de información: la expresión 2 + 2 contiene más información que la expresión = 4. Si todo lo que conocemos es que la suma de dos números da 4, no podemos saber si se han sumado 1 + 3, 2 + 2, 0 + 4, o algún otro par de números. Dado que la salida está implícita en la entrada, ningún proceso de computación puede generar información.

En realidad, en la forma en que hoy los efectuamos, muchas de las operaciones de los procesos de cómputo son operaciones de destrucción de información. La llamada "puerta *Y*" es un dispositivo con dos líneas de entrada, cada una de las cuales puede hallarse en estado 1 o en estado 0, y una línea de salida, cuyo valor depende de los valores de las señales de entrada. Si ambas señales son 1, la señal de salida será también 1. Pero si alguna entrada, o ambas, es 0, la salida también será 0. Cada vez que la salida de la puerta sea un 0 habremos perdido información, porque con sólo este dato no podremos saber en cuál de las tres combinaciones de estados se encontraban las entradas (a saber, 0 y 1, ya 1 y 0, o bien 0 y 0). En realidad, toda puerta lógica binaria cuyo número de líneas de entrada sea mayor que el de líneas de salida habrá, ineludiblemente, de desechar información, ya que será imposible deducir sin ambigüedad los estados de las entradas a partir de las salidas. Siempre que utilicemos una de tales puertas "lógicamente irreversibles" disiparemos energía en el ambiente. Otra de las operaciones habituales en computación, el borrado de un bit de memoria, constituye también una operación esencial-



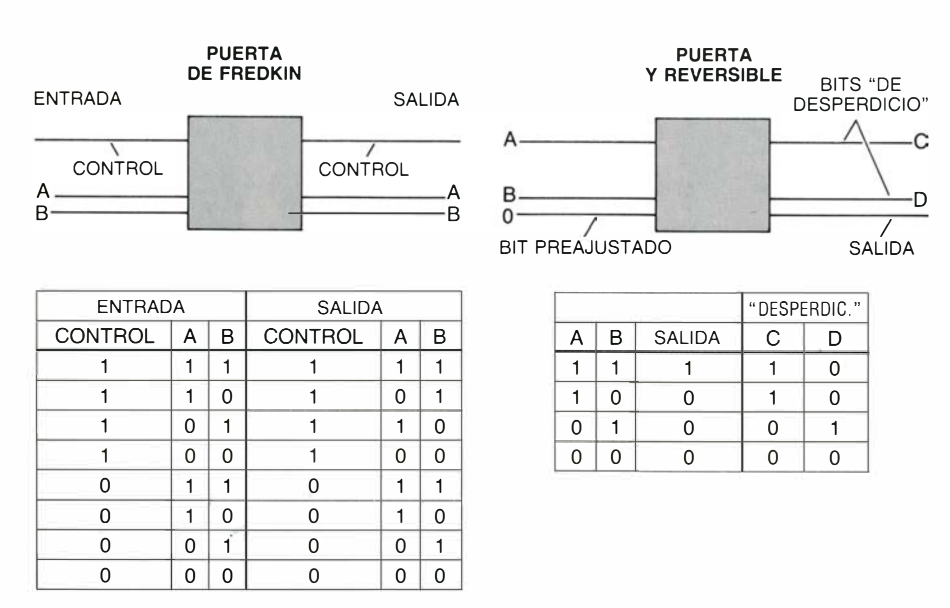
1. LOS DISPOSITIVOS ORDINARIOS de cómputo, desde el viejo ábaco hasta el microcircuito electrónico, disipan energía al funcionar. Las "puertas lógicas", elementos esenciales del microcircuito, disipan energía porque eliminan información. El microcircuito también consume energía por otra razón no tan esencial: aun limitándose a almacenar información, sin procesarla, sus circuitos absorben energía. También el ábaco es disipativo, a causa del rozamiento entre sus cuentas y varillas. Este rozamiento resulta indispensable. De no existir, las cuentas cambiarían incontroladamente de posición en virtud de la agitación térmica, aleatoria. Para vencer el rozamiento estático se requiere cierta fuerza, independiente de la velocidad con que nosotros movamos las cuentas. En consecuencia, por muy lentamente que se realicen, los cálculos con el ábaco exigen, como umbral mínimo, una determinada energía.



A	B	SALIDA
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

A	B	SALIDA
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

2. LAS PUERTAS LOGICAS ORDINARIAS disipan energía, porque eliminan información. Por ejemplo, cuando la salida de una puerta *Y* es 0, no hay forma alguna de deducir cuál fue la entrada exacta.



ENTRADA			SALIDA		
CONTROL	A	B	CONTROL	A	B
1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0

			"DESPERDIC."	
A	B	SALIDA	C	D
1	1	1	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	0	1
0	0	0	0	0

3. LA PUERTA LOGICA REVERSIBLE, de Fredkin, no tiene por qué disipar energía; la entrada es siempre deductible de la salida. La puerta tiene una línea de "control", cuyo valor no es modificado por la puerta. Si el bit de la línea de control es un *0*, también los valores de las otras dos líneas quedan intactos; en cambio, si es un *1*, el valor que ingresa por la línea *A* sale por la línea *B*, y viceversa. Conectando puertas reversibles se puede llevar a cabo cualquier función realizada por una puerta irreversible. Para efectuar la operación *Y (a la derecha)* una de las entradas se preajusta a *0*, y se dejan temporalmente de lado dos bits de salida, los llamados bits de desperdicio. Concluido el cómputo, se utilizan estos bits para hacer funcionar la puerta "marcha atrás"; la computadora torna a su estado inicial.

mente disipativa; siempre que borramos un bit perdemos toda la información acerca del anterior estado de ese mismo bit.

¿Son las puertas irreversibles y las operaciones de borrado imprescindibles para la computación? De ser así, todo cómputo que realicemos habría de disipar una cantidad mínima de energía.

Uno de los autores (Bennett) demostró, en 1973, que estas operaciones no eran esenciales. Desde aquella fecha, tal conclusión ha sido puesta de manifiesto por medio de varios modelos; de ellos, los más sencillos de describir son los basados en los llamados "elementos lógicos reversibles", como la puerta de Fredkin, así bautizada en honor de Edward Fredkin, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). La puerta de Fredkin tiene tres líneas de entrada y tres de salida. La señal de una de las líneas de entrada, llamada canal de control, ingresa en la puerta, la atraviesa y sale intacta de ella. Si el canal de control se pone a 0, las señales de las otras dos entradas atravesarán también intactas la puerta. Empero, si la línea de control está en 1, las salidas de las otras dos líneas se permutarán entre sí: la entrada de una línea pasará a ser la salida de la otra, y viceversa. La puerta de Fredkin no elimina información alguna; la entrada es siempre unívocamente deducible a partir de la salida.

Fredkin ha demostrado que todos los dispositivos lógicos de un ordenador pueden construirse combinando adecuadamente puertas de Fredkin. Para hacer funcionar el cómputo, determinadas líneas de entrada de algunas de las puertas de Fredkin han de ponerse antes en valores particulares [*véase la figura 3*].

Las puertas de Fredkin tienen más líneas de salida que las puertas que con ellas vamos a simular. De este modo, durante el proceso de computación se generan lo que en apariencia son "bits de desperdicio", es decir, informaciones elementales desprovistas de utilidad a primera vista. Si pretendemos volver a utilizar la computadora, es preciso, de una forma u otra, eliminar de la máquina tales bits; mas para borrarlos tendremos que disipar toda la energía que pretendíamos ahorrar.

La verdad es que estos bits son de utilidad superlativa. Una vez que hayamos copiado el resultado de nuestro cómputo, que residirá en los bits de salida normales, nos ceñiremos a hacer funcionar el ordenador marcha atrás. Es decir, introduciremos "por la trasera" del ordenador, a modo de señales de entrada, los "bits de desperdicio", más los bits de salida resultantes del funcionamiento normal. Podemos hacerlo así porque cada una de las puertas lógicas del ordenador es reversible. Al hacer funcionar marcha atrás al ordenador no se elimina información, y por tanto, no es necesario disipar energía. Al cabo, el ordenador quedará exactamente como se encontraba antes de que comenzase el cómputo. Por consiguiente, es posible cerrar del todo "un ciclo de cómputo", es decir, hacer funcionar un ordenador y retornarlo después a su estado primitivo, sin disipación alguna de energía.

Hasta ahora hemos estado analizando un conjunto de operaciones lógicas, y no un dispositivo físico. No es difícil, sin embargo, imaginar un dispositivo físico que funcione como puerta de Fredkin. En este imaginario dispositivo, los canales de información se representan por tubos. Un bit de información viene representado por la presencia o ausencia de una bola en una determinada sección de tubo; la presencia de una bola significa un 1 y, la ausencia de bola, un 0.

La línea de control está representada por un estrecho segmento del tubo, longitudinalmente dividido por la mitad. Cuando una bola penetra en este segmento escindido, empuja y separa sus dos mitades, actuando así a modo de dispositivo de conmutación. Este dispositivo de conmutación —"de cambio de agujas", por así decirlo— encauza y dirige cualesquiera otras bolas de entrada que pudiera haber en los otros dos tubos; cuando en la línea de control hay presente una bola, toda bola que penetre por uno de los conductos de entrada se dirige automáticamente hacia el otro conducto. A fin de

garantizar que el conmutador quede cerrado cuando no esté presente ninguna bola de control, unos muelles mantienen juntas las dos mitades del tubo escindido. Una bola de control ha de gastar energía para comprimir los resortes, pero tal energía no se pierde; podemos recuperarla al salir del tubo escindido la bola de control y volverse a expandir los muelles.

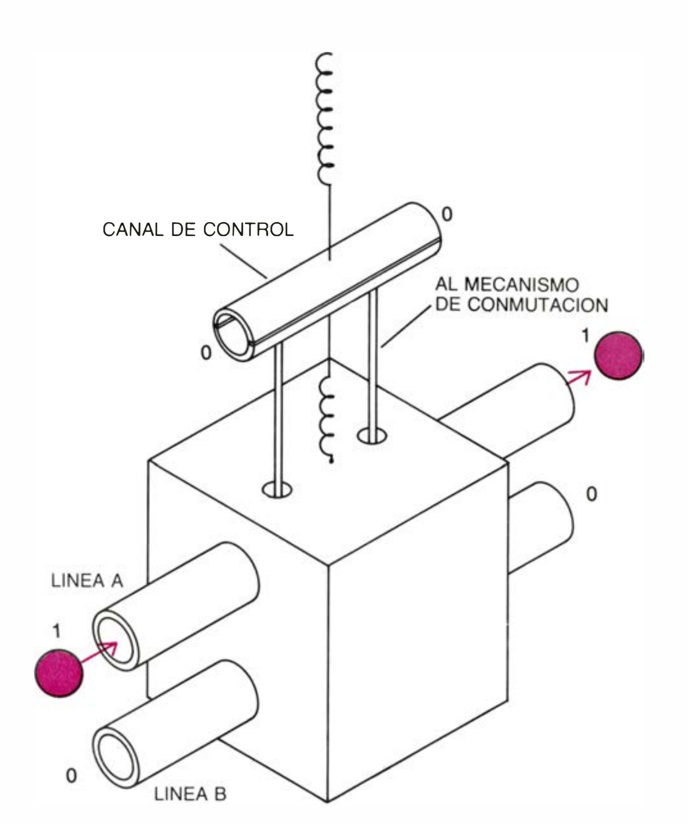
Todas las bolas están enlazadas entre sí. Se van empujando hacia adelante por un único mecanismo; avanzan, pues, en sincronía. De no ser así, no podríamos estar seguros de que las diversas bolas de entrada y de control llegasen juntas a una puerta lógica. En cierto sentido, el avance del proceso de cómputo no es sino un movimiento a lo largo de un único grado de libertad, como el movimiento de dos ruedas rígidamente sujetas a un eje común. Una vez llevado a cabo el cómputo, empujamos hacia atrás todas las bolas, deshaciendo así todas las operaciones realizadas, y haciendo retornar el ordenador a su estado inicial.

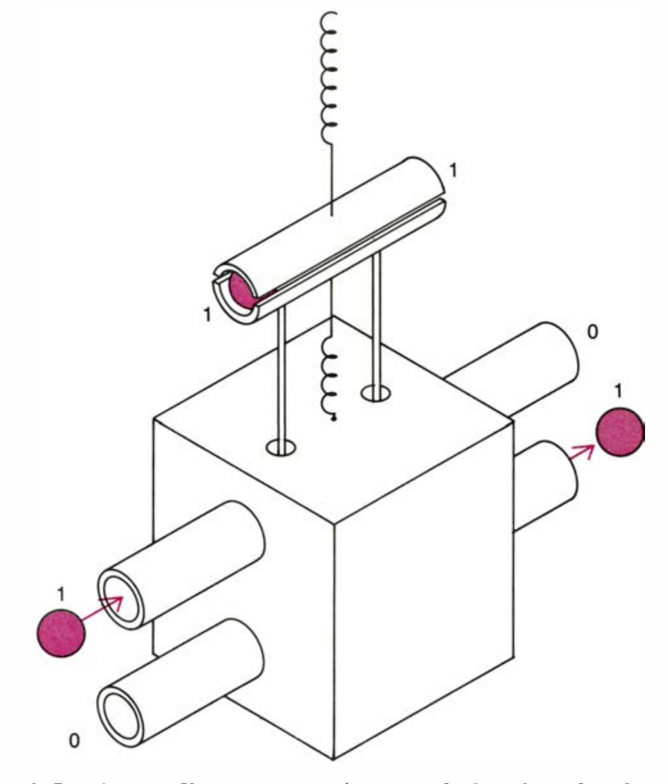
Si todo el montaje estuviera inmerso en un fluido viscoso ideal, las fuerzas de rozamiento que actuarían sobre las bolas serían proporcionales a su velocidad, y no existiría rozamiento estático. Así pues, las fuerzas de fricción serían muy débiles, si nos contentásemos con mover las bolas lentamente. En todo sistema mecánico, la energía requerida para trabajar contra la fricción es igual al producto de la fuerza de rozamiento por la distancia recorrida por el sistema. (Así pues, cuanto más velozmente avance un nadador al recorrer la distancia entre dos puntos, tanta más energía habrá de gastar, y ello, a pesar de que el recorrido es el mismo, vaya el nadador rápida o lentamente.) Haciendo pasar a poca velocidad las bolas por las puertas de Fredkin, la energía disipada (producto de la fuerza por la distancia recorrida) será pequeña, porque las fuerzas de rozamiento son directamente proporcionales a la velocidad de la bola. Más aún, podemos gastar tan poca energía como queramos, sin más que tomarnos suficiente tiempo para realizar la operación. Por consiguiente, no hay una cantidad mínima y prefijada de energía que gastar para efectuar un cómputo dado.

En este modelo, la energía perdida por rozamiento será muy pequeña si la máquina se hace funcionar muy lentamente. ¿Será posible diseñar una máquina más idealizada, capaz de computar sin ningún rozamiento? ¿Es acaso la fricción esencial para los procesos de cómputo? Fredkin, con Tommaso Toffoli y otros miembros del MIT, han demostrado que no.

Lo que el grupo del MIT ha probado es la posibilidad de efectuar un cómputo disparando, unas contra otras, bolas de billar ideales, carentes de rozamiento. En el modelo de bolas de billar hay, además, "espejos" perfectos, superficies ideales capaces de redirigir el movimiento de las bolas, situados de modo tal que el desplazamiento de las bolas por la superficie de la mesa emula el paso de bits de información a través de puertas lógicas [*véase la figura 5*]. Lo mismo que antes, la presencia de una bola en una determinada zona de la mesa significa un 1, mientras que su ausencia denota un 0. Si dos bolas llegan simultáneamente a una puerta lógica, chocan, y sus trayectorias cambian; sus nuevas trayectorias definen la salida de la puerta. Toffoli y otros han descrito disposiciones de espejos que equivalen a diferentes tipos de puertas lógicas, y han demostrado ser posible construir modelos "de billar" que simulen cualesquiera elementos lógicos necesarios para la computación.

Para iniciar el cómputo disparamos bolas de billar hacia el interior de la computadora en todos los lugares donde deseemos poner un 1. Es preciso





4. VERSION MECANICA IDEALIZADA de una puerta de Fredkin. Las líneas de entrada y salida son ahora tubos; los valores binarios *0* y *1* se traducen en la presencia o ausencia de una bolita. La función del canal de control está encomendada a un tramo de tubo, estrecho y escindido a lo largo. Al pasar por él una bolita, las dos mitades se separan y accionan un "cambio de agujas": este mecanismo hace que las bolas que penetran por la línea *A* salgan por la *B*, y viceversa. Unos resortes mantienen cerrado el canal cuando no hay en él ninguna bola. Para funcionar, esta puerta no requiere rozamiento estático; podría estar inmersa en un fluido viscoso y hacer que las fuerzas de fricción dependieran de la velocidad de las bolas. En tal caso, la disipación de energía podría ser tan pequeña como se quisiera. Para rebajar el consumo de energía bastaría pasar más lentamente las bolas a través del artefacto.

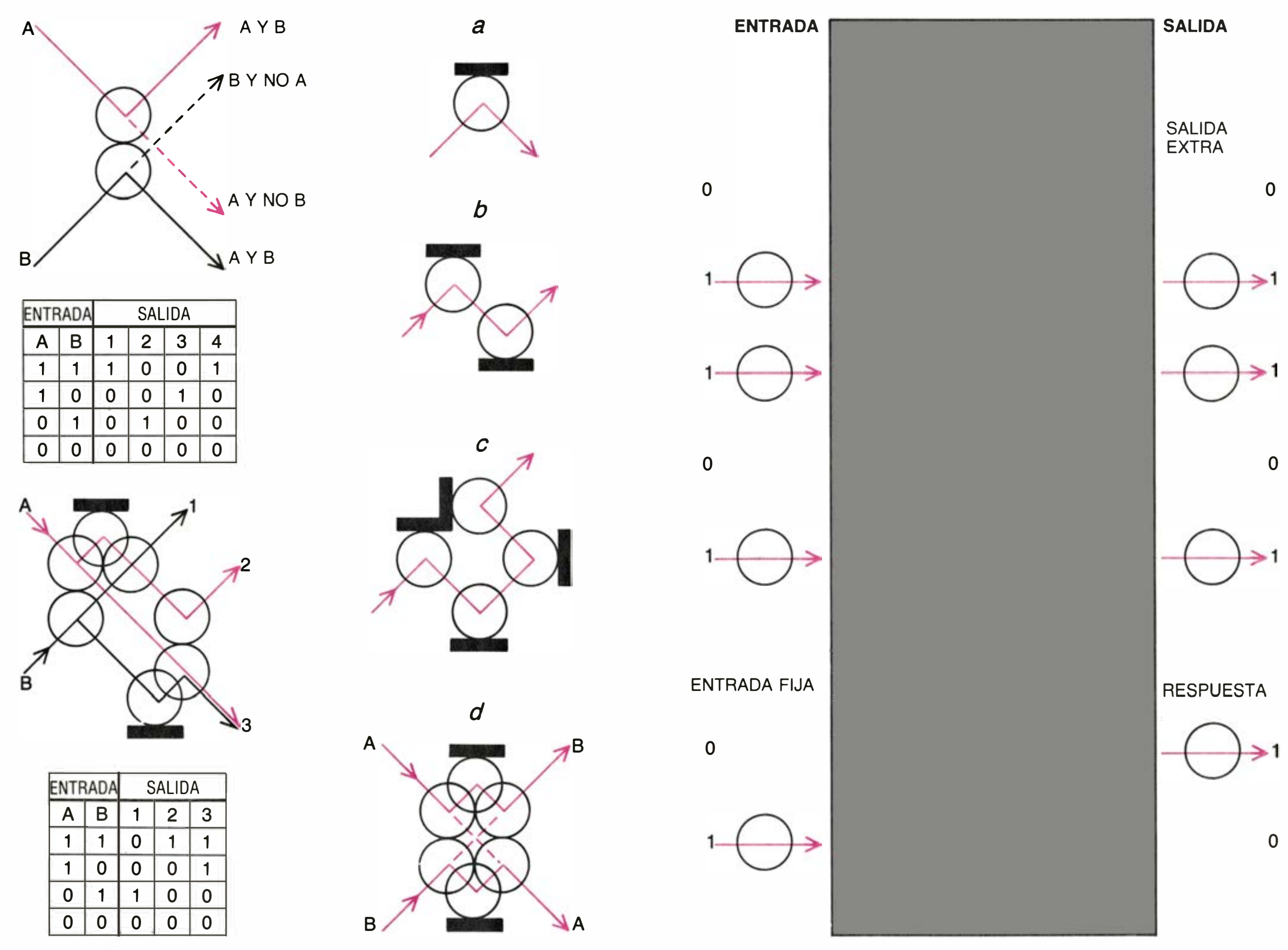
que todas las bolas entren en la máquina simultáneamente. Dado que son perfectamente elásticas, al chocar no pierden energía; cuando salgan de la máquina, la suma total de sus energías cinéticas será la misma que les dimos al principio.

Un ordenador de "bolas de billar" produce al funcionar "bits de desperdicio", lo mismo que el construido mediante puertas de Fredkin. Una vez que el ordenador ha llegado a una solución, hacemos que las bolas se reflejen de retorno hacia su interior, volviendo por donde vinieron, deshaciendo así el cómputo. Acabarán saliendo de la máquina exactamente por donde entraron y a la misma velocidad. El mecanismo que las proyectó hacia el interior de la máquina puede aprovecharse para absorber su energía cinética. Habremos nuevamente realizado un cómputo, y devuelto al ordenador a su estado inicial sin disipar energía.

La computadora "de bolas de billar" presenta un grave fallo: es sumamente sensible a ligeros errores. Basta una leve imprecisión en la dirección de una bola, o que el ángulo de orientación de uno de los espejos sea ligeramente incorrecto, para que las trayectorias de las bolas se desvíen mucho de lo previsto. Una o más bolas se apartarán de las rutas previstas, y con el tiempo, los errores irán acumulándose hasta invalidar totalmente el cálculo. Aun suponiendo que pudieran fabricarse bolas de billar perfectamente elásticas y sin rozamiento, bastarían los diminutos y caóticos movimientos de agitación térmica de las moléculas que las componen para provocar errores al cabo de unas cuantas docenas de colisiones.

Evidentemente, podríamos instalar algún tipo de dispositivo de corrección, que devolviese cualesquiera bolas errantes a sus trayectorias previstas, pero entonces estaríamos suprimiendo información relativa al pasado de la bola. Por ejemplo, podríamos estar desechando información relativa al grado en que es incorrecta la orientación de un espejo. Para eliminar información, aunque sea para librarnos de un error, es preciso que haya fricción y pérdida de energía. Por consiguiente, todo sistema de corrección tiene que disipar algo de energía.

Muchas de las dificultades inherentes a la computadora "de billar" podrían resultar menos extremas si en lugar de bolas de billar utilizásemos partículas microscópicas o submicroscópicas, electrones, por ejemplo. Como ha señalado Wojciech H. Zurek, actualmente en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, las leyes cuánticas, que restringen el movimiento de las partículas



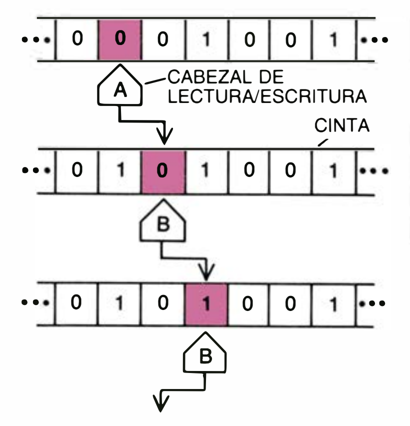
ENTRADA		SALIDA			
A	B	1	2	3	4
1	1	1	0	0	1
1	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0

ENTRADA		SALIDA		
A	B	1	2	3
1	1	0	1	1
1	0	0	0	1
0	1	1	0	0
0	0	0	0	0

5. COMPUTADORA "DE BILLAR". Se vale del movimiento de las bolas sobre una mesa de billar para simular el paso de bits a través de puertas lógicas. En las puertas lógicas "de billar" *(izquierda)*, las trayectorias de las bolas son redirigidas, mediante colisiones de unas contra otras o con "espejos deflectores". Además del papel que desempeñan en las puertas, los espejos pueden desviar la trayectoria de una bola *(a)*, desplazar la trayectoria hacia un lado *(b)*, retrasar el movimiento de la bola sin cambiar ni su posición ni dirección finales *(c)* o hacer que dos rectas se crucen *(d)*. Es posible disponer los espejos de modo que la "computadora" resultante lleve a cabo las funciones de cualquier microcircuito lógico. Por ejemplo, podría idearse una computadora "de billar" capaz de verificar si un número determinado es o no primo. Un tal procesador *(derecha)* admite como entrada un número cualquiera de cinco dígitos binarios (en este caso, 01101, o sea, 13), y la secuencia de entrada, fija, 01. Al igual que las puertas de Fredkin, una computadora de billar entrega normalmente más bits de los que su usuario necesita. En el ejemplo que aquí ilustramos, la computadora entrega el propio número inicial (que constituye la "salida extra"), más una secuencia "de respuesta", que es 10 si el número introducido es primo, y 01, si el número es compuesto.

a unos cuantos estados, podrían eliminar la posibilidad de que las partículas se desviasen ligeramente.

Aunque hasta ahora nuestro análisis se ha basado sobre todo en la dinámica clásica, varios investigadores han propuesto otros ordenadores reversibles fundados en principios de mecánica cuántica. Tales ordenadores, inicialmente propuestos por Paul Benioff, del Laboratorio Nacional de Argonne, y refinados después por otros, y de modo notable por Richard P. Feynman, del Instituto de Tecnología de California, han recibido un tratamiento que se mueve en un terreno muy abstracto. En esencia, la disposición de las partículas de estas computadoras sería tal que las reglas de mecánica cuántica que gobiernan sus interacciones serían precisamente análogas de las reglas que describen las salidas predichas de las diversas puertas lógicas reversibles. Por ejemplo, supongamos que el espín de una partícula solamente pueda tener dos valores: hacia arriba —up— (que equivaldría a un 1 binario), y hacia abajo —down— (que correspondería a un 0). Las interacciones entre los espines de las partículas pueden establecerse de modo tal que el valor del espín de una partícula cambie en función de los espines de las partículas cercanas. El espín de la partícula correspondería entonces a una de las salidas de una puerta lógica.



REGLAS DE TRANSICION				
ESTADO DEL CABEZAL	BIT LEIDO	NUEVO BIT	NUEVO ESTADO	IR A LA
A	1	0	A	IZQUIER.
A	0	1	B	DERECH.
B	1	1	A	IZQUIER.
B	0	0	B	DERECH.

6. PUEDE CONSTRUIRSE UNA MAQUINA DE TURING capaz de efectuar cualquier cómputo que esté al alcance de un ordenador. Una cinta infinitamente larga se divide en segmentos, cada uno de los cuales porta, ya un 0, ya un 1. Un "cabezal de lectura/escritura", con un número prefijado de estados internos, por los que puede ir pasando, se desplaza a lo largo de la cinta (en nuestro caso, sólo hay dos estados, el *A* y el *B*). Cada ciclo comienza al leer el cabezal un bit en uno de los segmentos de la cinta. De seguido, y de acuerdo con un sistema fijo de reglas de transición, el cabezal graba un bit sobre dicho segmento, cambia de estado interno y se desplaza un paso hacia la derecha o izquierda. Dado que esta máquina de Turing tan sólo tiene dos estados, únicamente puede efectuar cálculos triviales; otras máquinas más complejas, con mayor número de estados internos, son capaces de simular a cualquier ordenador, aunque sea mucho más complicado que ellas mismas. A tal fin, registran en la cinta, que es infinita, una representación completa del estado lógico de la máquina grande, y descomponen cada ciclo complejo en un número mayor de pasos sencillos. La máquina aquí mostrada es reversible: siempre es posible deducir cuál fue la configuración que antes presentó la máquina. Hay máquinas de Turing no reversibles.

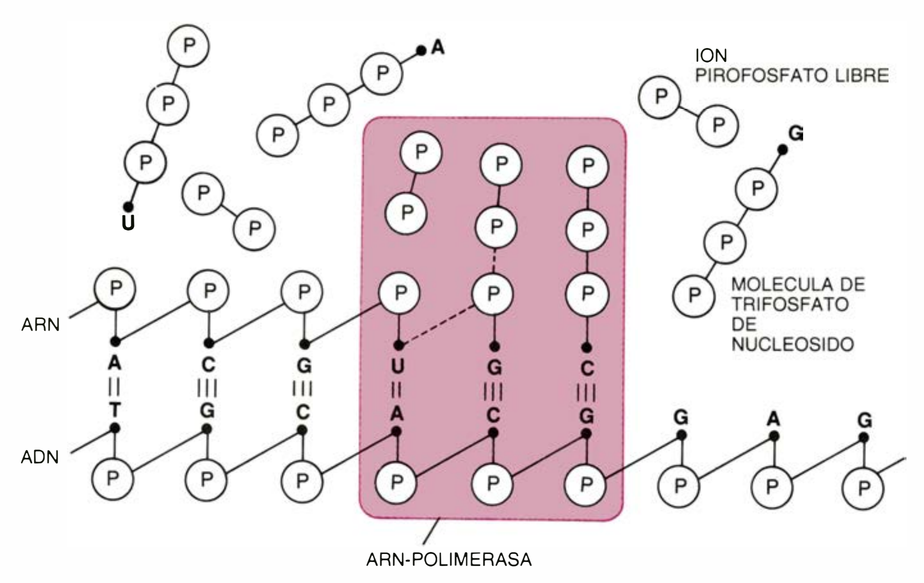
Hasta el momento, el análisis se ha polarizado en el procesamiento de información. Pero los ordenadores no sólo tienen que procesar información, deben también almacenarla. La mejor forma de describir la relación entre el almacenaje y el procesamiento de información es mediante un dispositivo llamado máquina de Turing, en honor de Alan M. Turing, el primero en proponer tal artilugio, en 1936. Una máquina de Turing puede llevar a cabo cualquier cómputo que realice un ordenador moderno. Uno de los autores (Bennett) ha demostrado que es posible construir una máquina de Turing reversible; esto es, una máquina de Turing que no elimine información, y que, consiguientemente, pueda hacerse funcionar con un consumo de energía tan reducido como el usuario desee.

La máquina de Turing consta de varios componentes. Tiene una cinta, dividida en segmentos o casillas individuales, cada una de las cuales está marcada con un 0 o un 1. Estos bits representan la "entrada". A lo largo de la cinta se desplaza un cabezal de "lectura y escritura". Este cabezal desempeña diversas funciones. Puede leer los bits de la cinta, de uno en uno, puede imprimir un bit en la cinta y puede desplazarse de posición un paso hacia la derecha, o hacia la izquierda, cada vez. Para recordar lo que está haciendo al pasar de un ciclo al siguiente, el mecanismo del cabezal posee cierto número de distintos "estados"; cada estado está definido por una configuración distinta de las piezas internas del cabezal.

En cada ciclo, el cabezal lee el bit grabado en el segmento que en ese momento él ocupa; seguidamente imprime un nuevo bit en la cinta, cambia su estado interno y se desplaza un paso hacia la derecha o izquierda. El bit que haya de imprimir, el estado al que haya de cambiar y el sentido en el que haya de moverse están determinados por un conjunto fijo de reglas de transición. Cada regla especifica un conjunto bien determinado de acciones. La regla concreta que en cada momento la máquina ha de seguir queda fijada inequívocamente por el estado del cabezal y el valor del bit que lee en la cinta. Una tal regla, por ejemplo, podría ser: "Si el cabezal se encuentra en el estado *A*, situado sobre un segmento de cinta que lleva grabado un 0, debe cambiar ese bit en un 1, cambiar su estado al *B* y avanzar un segmento hacia la derecha". Puede ocurrir que la regla de transición instruya a la máquina para no cambiar su estado interno, no imprimir en la cinta un nuevo bit o para que detenga su funcionamiento. No todas las máquinas de Turing son reversibles, pero sí se puede construir máquinas de Turing reversibles, capaces de realizar todo cómputo posible.

Los modelos de máquina de Turing reversibles presentan una ventaja sobre máquinas tales como la computadora de bolas de billar sin rozamiento. En la computadora "de billar", el movimiento de agitación térmica provoca errores imposibles de evitar. Los modelos de máquina de Turing reversibles sacan, en realidad, partido de la agitación térmica. Están construidos de modo tal, que la propia agitación térmica, ayudada por una fuerza impulsora muy débil, va haciendo pasar la máquina de un estado al siguiente. El desarrollo del cómputo recuerda el movimiento de un ion (una partícula eléctricamente cargada) suspendido en una disolución mantenida en un campo eléctrico débil. Al observarlo durante un breve tiempo, el movimiento del ion parece totalmente aleatorio; es casi igual de probable que se mueva en una dirección como en otra. Sin embargo, al estar sometido a la fuerza del campo eléctrico, su movimiento tiene una dirección preferida, es decir, es ligeramente más probable que el ion se mueva en una cierta dirección que en otras.

Al principio puede parecer imposible que una sucesión de operaciones tan dirigidas a un fin como las que integran un cómputo se desarrolle mediante un aparato cuya dirección de movimiento en un instante cualquiera es prácticamente aleatoria. No obstan-



7. UNA ENZIMA, LA ARN-POLIMERASA, actúa a modo de máquina reversible copiadora de cintas. Esta enzima cataliza la reacción por la que se sacan en ARN copias de tramos de ADN. Conforme la enzima va desplazándose a lo largo de un filamento de ADN, va seleccionando de la disolución ambiente una molécula de trifosfato de nucleósido (una base de ARN ligada a un azúcar y a una "cola" de tres grupos fosfato) que sea complementaria de la base de ADN que está a punto de ser copiada. Seguidamente, conecta la nueva base al extremo de la hebra de ARN y deja libre un ion pirofosfato, compuesto por dos iones fosfato. La reacción es reversible: a veces, la enzima toma el último eslabón del ARN, lo liga a un ion pirofosfato y devuelve a la disolución la molécula producida, retrocediendo una muesca en el filamento de ADN. Cuando la reacción se aproxima a su equilibrio químico, la enzima da casi iguales números de pasos de avance como de retroceso, y la energía neta necesaria para copiar un tramo cualquiera de ADN es muy pequeña. La reacción se hace tanto menos disipativa cuanto más lentamente progrese; no hay un umbral mínimo de energía que gastar para copiar un tramo de la molécula de ADN.

te, en el mundo submicroscópico de las reacciones químicas, este tipo de funcionamiento se da con frecuencia. En ellas, los movimientos de tanteo del movimiento browniano, o de la caótica agitación térmica, bastan para poner en contacto las moléculas reaccionantes, para orientarlas y arquearlas, dándoles la conformación específica necesaria para que reaccionen, y para separar las moléculas producidas tras la reacción. En principio, todas las reacciones químicas son reversibles: el mismo movimiento browniano causante de la reacción en un sentido pone en contacto las moléculas de producto, y las fuerza a repetir la transición en sentido inverso. En los estados de equilibrio químico, las reacciones en sentido inverso cuentan con la misma probabilidad de ocurrir que las de sentido directo.

A fin de que una reacción progrese en el sentido deseado, hemos de ir suministrando moléculas de los reactivos, e ir retirando las moléculas de los productos; tenemos, en efecto, que proporcionar una pequeña fuerza inductora. Cuando ésta es realmente muy pequeña, la reacción puede dar casi igual número de pasos hacia atrás como hacia adelante, pero en promedio progresará hacia adelante. Para proporcionar la fuerza inductora hemos de gastar energía; mas, al igual que en la realización con bolas y tubos de la puerta de Fredkin, la energía total que dediquemos a ello puede ser tan pequeña como se quiera; con tal de estar dispuestos a conceder al proceso el tiempo que requiera, no habrá una cuota mínima prefijada de energía que gastar. La causa es que la energía total disipada es función del cociente entre los números de pasos hacia adelante y hacia atrás. (En realidad, es proporcional al logaritmo de este cociente, el cual crece o decrece según haga el cociente). Cuanto más lenta sea la reacción en sentido progresivo, tanto menor será el cociente. (También aquí es válido el símil de los nadadores rápidos y lentos: se requiere menos energía total para dar un mismo número neto de pasos hacia adelante si la reacción se desplaza lentamente.)

Podemos comprender cómo funcionaría una máquina de Turing browniana estudiando una máquina copiacintas que nos ofrece la naturaleza: la ARN-polimerasa, enzima que facilita la construcción de copias formadas por ARN del ADN que constituye un gen. Cada hebra de ADN se asemeja mucho a la cinta de una máquina de Turing. En cada posición de la hebra se encuentra una de las cuatro "bases" siguientes: adenina, guanina, citosina o timina (en abreviatura, *A, G, C* y *T*). El ARN es una cadena molecular parecida, cuyas cuatro bases, adenina, guanina, citosina y uracilo *(A, G, C* y *U)* se ligan a bases "complementarias" del ADN.

La ARN-polimerasa cataliza esta reacción de emparejamiento. De ordinario, la hélice de ADN está rodeada por una disolución que contiene un gran número de moléculas de trifosfato de nucleósido, formada cada una por una base de ARN enlazada con un azúcar, más una cola de tres grupos fosfato. La enzima ARN-polimerasa selecciona de esta disolución una única base de ARN, complementaria de la que en el filamento de ADN está a punto de copiarse. Seguidamente, adhiere la nueva base al extremo del filamento de ARN en crecimiento, y libera dos de los fosfatos, que, en forma de ion pirofosfato libre, pasan a la disolución que rodea al ADN. Seguidamente, la enzima se desplaza una muesca a lo largo del filamento de ADN, preparándose para uncir al ARN la siguiente base. El resultado es un filamento de ARN complementario del filamento de ADN, una especie de vaciado, cuyo molde sería el ADN. De no ser por la ARN-polimerasa, este conjunto de reacciones ocurriría muy lentamente, y habría muy poca garantía de que las moléculas de ARN y ADN fuesen complementarias.

Las reacciones anteriores son reversibles. A veces, la enzima toma un ion pirofosfato libre, lo combina con la última base del filamento de ARN y libera el trifosfato de nucleósido así producido, que pasa a la solución ambiente, al tiempo que retrocede una muesca en la hebra de ADN. En el equilibrio, los pasos de avance y retroceso acontecerían con igual frecuencia; normalmente, otros procesos metabólicos hacen progresar la reacción, retirando del medio el pirofosfato y proporcionando las cuatro clases de trifosfato de nucleósido. Puede hacerse variar en el laboratorio la velocidad con que actúa la ARN-polimerasa, ajustando las concentraciones de los reaccionantes (como han demostrado Judith Levin y Michael J. Chamberlin, de la Universidad de California en Berkeley). Al ir las concentraciones acercándose a las de equilibrio, la enzima opera más lentamente, y disipa menos energía al copiar un determinado tramo de ADN, por ser menor el cociente entre los pasos de progresión y retroceso.

Aunque la ARN-polimerasa se limita a copiar información, sin procesarla, es relativamente fácil imaginar como podría funcionar una hipotética máquina de Turing química. La cinta sería una larga molécula, que serviría de espinazo, y a la cual se irían ligando, en posiciones periódicamente repetidas, dos tipos de bases, representantes

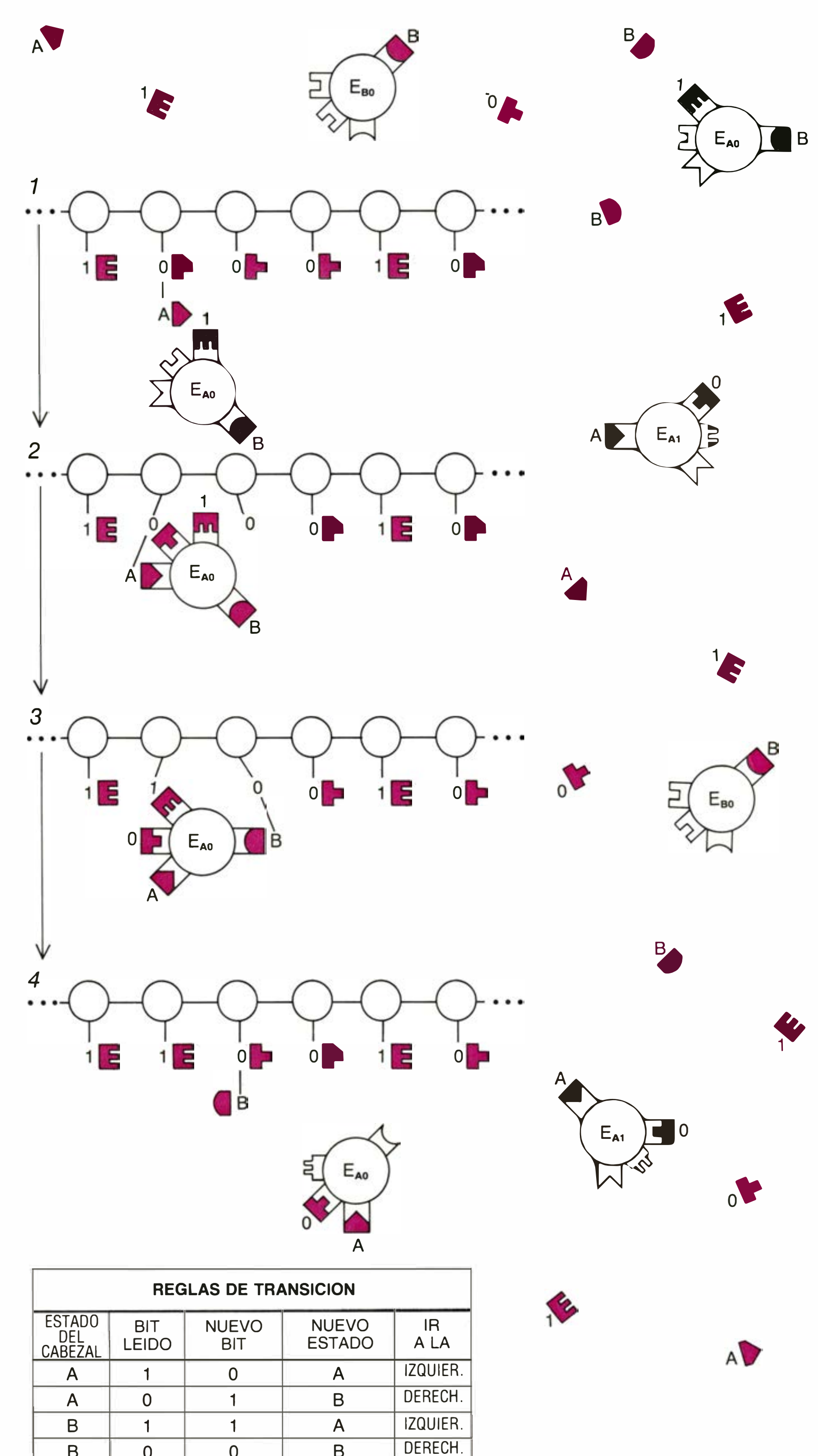
del 0 y el 1 binarios. En una de las posiciones activas de la molécula, ligada a uno de los grupos 0 o 1, se encontraría una pequeña molécula adicional, que representaría la posición del cabezal de la máquina de Turing. Habría varios tipos diferentes de "molécula cabezal", representantes cada una de un estado distinto de la máquina.

Las reglas de transición de la máquina se indicarían por enzimas. Cada una de éstas cataliza una reacción determinada. Para ver cómo funcionan las enzimas, lo mejor será recurrir a un ejemplo.

Supongamos que la molécula cabezal sea del tipo *A* (lo que indica que la máquina se encuentra en estado *A*), y que esté ligada a una base 0. Supongamos también que valga la siguiente regla de transición: "Cuando el cabezal se encuentre en estado *A* y lea un 0, cambiar el 0 por un 1, pasar al estado *B* y desplazar el cabezal hacia la derecha". Una molécula de enzima que represente esta regla tiene una zona activa que encaja con una molécula cabezal de tipo *A* ligada a una base de tipo 1. Tiene también una zona activa que encaja con una base 0 y una zona que encaja con una molécula cabezal *B* [*véase la figura 8*].

Para efectuar la transición, la molécula enzimática comienza por aproximarse a la molécula-cinta en un lugar situado inmediatamente a la derecha de la base en que reside el cabezal *A*. Después, despega de la cinta tanto la molécula cabezal como la base a la cual estaba ligado el cabezal, y coloca en el sitio que ocupaban una base 1. A continuación, liga un cabezal *B* a la base situada a la derecha de la base 1 que acaba de adherir a la cinta. En este momento, la transición ha terminado. El primitivo lugar de emplazamiento de la cabeza ha pasado de 0 a 1, la molécula cabezal es ahora de tipo *B*, y está ligada a la base situada una muesca a la derecha de la precedente posición del cabezal.

Durante el funcionamiento de una máquina de Turing browniana, la cinta tendría que permanecer sumergida en una disolución rica en moléculas enzimáticas, así como abundantes bases de tipo 0, 1 y cabezales de tipos *A* y *B*. Para que la reacción progresase en la dirección requerida tendría que haber otra reacción que despojase a las moléculas enzimáticas de los cabezales y bases que van desprendiendo. Las concentraciones de los reactivos encargados de la limpieza de las moléculas enzimáticas representan las fuerzas que impelen el avance de la máquina de Turing. Como antes, podemos consumir tan poca energía como queramos sin



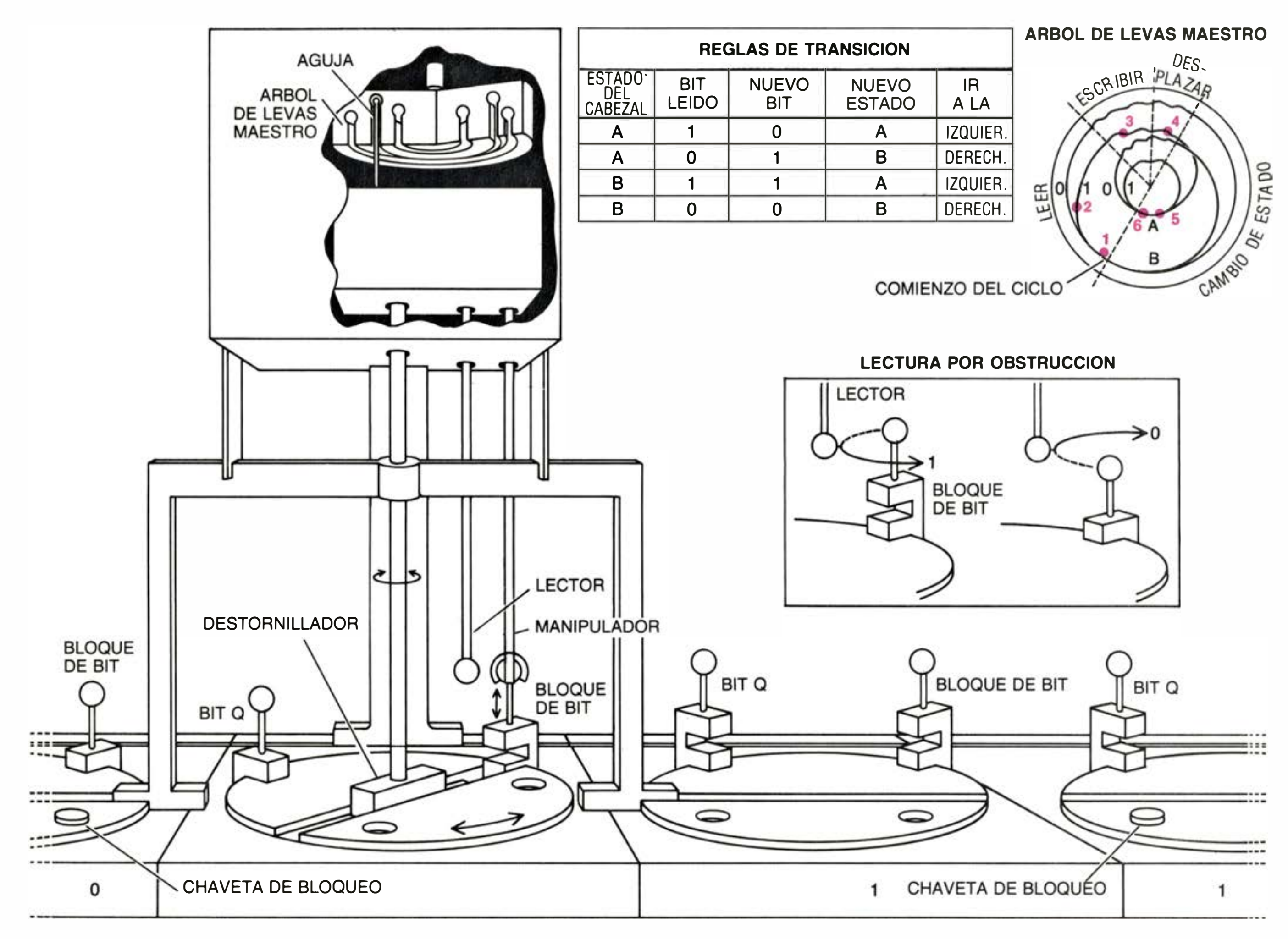
REGLAS DE TRANSICION				
ESTADO DEL CABEZAL	BIT LEIDO	NUEVO BIT	NUEVO ESTADO	IR A LA
A	1	0	A	IZQUIER.
A	0	1	B	DERECH.
B	1	1	A	IZQUIER.
B	0	0	B	DERECH.

8. UNA HIPOTETICA MAQUINA ENZIMATICA de Turing podría llevar a cabo cualquier cómputo, consumiendo menos energía que cualquier mínimo prefijado. A lo largo de una molécula "espinazo", y a intervalos regulares, están ligadas moléculas menores, que representan los dígitos binarios 0 y 1. Una pequeña molécula adicional, que hace el papel del cabezal de la máquina de Turing, está ligada al grupo 0 o 1, que ocupa una determinada ubicación de la cadena *(1)*. Existen varios tipos de molécula cabezal, cada uno de los cuales representa un estado interno distinto, en la máquina. Las reglas de transición están indicadas por enzimas. En cada ciclo, una enzima se enlaza con la molécula cabezal y con la molécula "bit" a la cual está ligada la cabezal *(2);* seguidamente, las despega de la cadena y pone en lugar de ambas la molécula "bit" apropiada *(3)*. Al tiempo de hacerlo, gira sobre sí misma, y así, enlaza la molécula cabezal al bit que ocupa la ubicación situada un lugar hacia la izquierda o derecha del bit recién cambiado. Ahora el ciclo está completo *(4):* se ha cambiado el valor de un bit, el cabezal ha mudado de estado y se ha desplazado de lugar. Cada clase de enzima puede catalizar un tal conjunto de reacciones. En el caso de la síntesis de ARN, puede hacerse que estas reacciones disipen una cantidad pequeña de energía.

más que hacer avanzar muy lentamente la máquina de Turing.

La máquina de Turing enzimática no estaría libre de errores. De cuando en cuando podría producirse una reacción no catalizada por ninguna de las enzimas; por ejemplo, pudiera ocurrir que una base 0 se despegara espontáneamente de la molécula-espinazo, y que su lugar fuese ocupado por una base 1. Y en efecto, durante la síntesis del ARN se dan errores similares.

En principio, sería posible eliminar los errores construyendo una máquina de Turing browniana a partir de piezas mecánicas rígidas y sin rozamiento. La máquina de Turing mecánica requiere menor grado de idealización que la computadora de bolas de billar, pero sí más que la máquina de Turing enzimática. Por una parte, sus piezas no tendrían que ser mecanizadas sin la más mínima tolerancia, como tendrían que serlo las bolas de la computadora-billar; dichas piezas encajan unas en otras con holgura, y la máquina podría funcionar incluso con valores elevados de ruido térmico. Empero, sus piezas tienen que ser perfectamente rígidas y desprovistas de rozamiento estático,



ESTADO DEL CABEZAL	BIT LEIDO	NUEVO BIT	NUEVO ESTADO	IR A LA
A	1	0	A	IZQUIER.
A	0	1	B	DERECH.
B	1	1	A	IZQUIER.
B	0	0	B	DERECH.

9. UNA MAQUINA DE TURING BROWNIANA, compuesta por piezas mecánicas, rígidas y sin rozamiento, iría cambiando de estado gracias al zangoloteo aleatorio de sus piezas, flojamente trabadas entre sí. Cuando una pieza se mantiene en su lugar, no es a causa del rozamiento, sino de los surcos y escotaduras de las piezas contiguas. La trabazón de las piezas entre sí es tal, que sólo pueden seguir una "ruta computacional" única. Aunque las piezas tienen juego, y pueden traquetear un poco, macroscópicamente, los únicos movimientos que pueden hacer corresponden a pasos de avance o retroceso en el cómputo. El funcionamiento de la máquina es inducido por una fuerza muy débil; en un instante dado, la probabilidad de que el cómputo avance o retroceda es casi la misma. Sin embargo, en promedio, la máquina irá avanzando, y el cómputo acabará llegando a término. Puede hacerse que la máquina disipe tan poca energía como el usuario quiera, sin más que aplicar una fuerza inductora adecuadamente débil. Los tramos de cinta están aquí representados por discos acanalados; los bits por piezas en forma de E, que quedan enclavadas en los discos, bien en la posición "arriba" (1), o "abajo" (0). El cabezal consiste en un montaje rígido y en un complicado mecanismo (no visible, en su mayor parte), del cual penden un lector, un manipulador y un vástago-destornillador. El funcionamiento de la máquina está gobernado por surcos grabados en un "árbol de levas maestro" *(arriba, izquierda y ángulo superior derecho)*, que recuerda a un disco fonográfico. Los distintos surcos corresponden a diferentes estados del cabezal. Al comenzar un ciclo, se sitúa el cabezal sobre uno de los discos, y una "aguja", en el tramo "de lectura" del surco que corresponde en el árbol maestro al actual estado del cabezal de la máquina. Durante la fase "de lectura" del ciclo *(1)*, el lector determina, mediante un proceso de lectura por obstrucción, si el bloque señalizador de bit de ese disco se halla arriba o abajo *(en medio, a la derecha)*. En la lectura por obstrucción, el lector se desplaza hasta rebasar el bloque, siguiendo una trayectoria alta o una baja. De las dos, una quedará obstruida por la bola que tiene el bloque en lo alto: así pues, el lector sólo podrá seguir una de las dos trayectorias. En el lugar del árbol de levas correspondiente a esta "decisión", se produce una bifurcación de los surcos: cada surco se escinde en dos, y se guía la aguja hacia el surco correspondiente al valor del bit *(2)*. Seguidamente, el árbol maestro gira, hasta que la aguja penetra en la "zona de escritura" *(3)*. En esta zona, cada surco contiene un juego diferente de "instrucciones", que ha de seguir la máquina; dichas instrucciones se transmiten mediante un complejo sistema, que conecta la aguja con el resto del mecanismo. Si las instrucciones requieren que cambie el valor de un bit, el manipulador entra en juego y ase la bola; después, el destornillador hace girar el disco hasta que el bloque quede suelto y pueda moverse, el manipulador hace subir o bajar el bloque, y el destornillador hace girar el disco otra vez, para retener al bloque en su lugar. Después de que la aguja ha pasado por la sección de "escritura" del árbol maestro, entra en la zona de "desplazamiento" *(4)*. En ésta, cada surco contiene instrucciones para llevar el cabezal un tramo hacia la derecha o izquierda. Seguidamente, la aguja entra en la zona de "cambio de estado" del árbol de levas *(5)*, en la que los surcos se reúnen de modo tal que la aguja cae en el surco representante del siguiente estado del cabezal. El ciclo queda ahora terminado *(6)*. Los discos contiguos al que se está leyendo permanecen en su lugar por el montaje del cabezal; los restantes se mantienen gracias a unas chavetas de bloqueo. Los bloqueos de cada disco están acoplados a un bit especial, llamado bit Q, de un disco adyacente. Los acoplamientos entre bits Q y chavetas de bloqueo se han construido de modo tal que el disco que en ese preciso momento se está leyendo tiene plena libertad para moverse, mientras que los otros discos situados a su derecha e izquierda quedan sujetos.

propiedades no conocidas en ningún cuerpo macroscópico.

Dado que las piezas de la máquina encajan unas en otras con holgura, lo que las retiene en su lugar no es el rozamiento, sino surcos o escotaduras talladas en las piezas vecinas [*véase la figura 9*]. Aunque cada elemento de la máquina tiene un poco de juego, lo mismo que las piezas de un rompecabezas muy usado, la máquina, en su conjunto, solamente puede seguir una única "trayectoria computacional". Es decir, las piezas de la máquina se traban entre sí de modo tal que, en un instante cualquiera, la máquina, globalmente, sólo puede realizar dos clases de movimiento: el movimiento correspondiente al avance de un paso computacional y el correspondiente a un paso hacia atrás.

La computadora sólo efectúa tales transiciones como resultado accidental de los movimientos de agitación térmica de sus piezas componentes, polarizados por la débil fuerza externa. Tiene probabilidad casi igual de retrogradar a lo largo de la trayectoria computacional, y deshacer la transición más reciente, como de avanzar por ella. Una fuerza pequeña, proporcionada desde el exterior, impulsa el avance del cómputo. Lo mismo que antes, esta fuerza puede ser todo lo pequeña que se quiera, y consiguientemente, no hay prefijada una cuota mínima de energía que gastar para hacer funcionar una máquina de Turing browniana mecánica.

Así pues, según la termodinámica clásica, para realizar un cómputo no haría falta consumir, como mínimo, una cuota prefijada de energía. ¿Está en conflicto este análisis termodinámico, de corte clásico, con la teoría cuántica? Después de todo, el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica expresa la proporcionalidad inversa entre nuestra incertidumbre sobre la duración de un proceso y nuestra incertidumbre sobre cuánta energía implica tal proceso. Algunos investigadores han sugerido que todo proceso de conmutación que acontezca en un breve período de tiempo ha de exigir un consumo de energía mínimo.

En realidad, el principio de incertidumbre no impone el consumo de una cuota mínima de energía a los acontecimientos de conmutación rápida. Solamente si pretendiéramos medir el momento exacto en que aconteció el suceso sería de aplicación el principio de incertidumbre. Ni siquiera en la mecánica cuántica hay dificultad para que se produzcan sin consumo energético sucesos extremadamente rápidos. Nuestra confianza en que la mecánica cuántica consiente procesos de cómputo que no exigen consumos mínimos se ve reforzada cuando recordamos que Benioff y otros han ideado modelos de computadoras mecánico-cuánticas reversibles, que no disipan energía y que obedecen a las leyes de la mecánica cuántica.

Así pues, no parece que el principio de incertidumbre imponga limitaciones fundamentales al proceso de computación; tampoco, la termodinámica clásica. ¿Querrá decir esto que no existen limitaciones de índole física para la computación? Lejos de eso. Las auténticas limitaciones están asociadas a cuestiones mucho más difíciles de responder que las formuladas en este artículo. Por ejemplo, ¿exigen las operaciones lógicas elementales como mínimo un determinado tiempo? ¿Cuál es el mínimo dispositivo capaz de llevar a cabo tales operaciones? Dado que las escalas de espacio y tiempo están ligadas por la velocidad de la luz, es verosímil que las respuestas de una y otra preguntas estén concatenadas. Empero, es posible que no podamos hallar tales respuestas, en tanto no se determine si las escalas de tiempo y espacio del universo tienen, en última instancia, una "granulación" irreductible.

En el otro extremo, ¿cuál es el máximo tamaño que podemos dar a la memoria de un ordenador? ¿Cuántas partículas del universo podemos como máximo reunir y ensamblar a tal objeto? El tamaño máximo de la memoria de un ordenador impone límites a la precisión de los cálculos. Por ejemplo, impondría un límite al número de cifras decimales con que podríamos calcular π. Los inevitables procesos de deterioro que sufren los ordenadores materiales plantean otra cuestión, tal vez relacionada con ésta: ¿es posible, al menos en teoría, reducir tal deterioro a un nivel tan bajo como se desee, o bien impone un límite al tiempo máximo de cómputo que podremos dedicar a un cálculo dado? Es decir, ¿existirán cálculos imposibles de terminar antes de que la maquinaria de cómputo se deteriore hasta quedar inservible?

Tales cuestiones se ocupan, en realidad, de las limitaciones que pesan sobre la ejecución material de operaciones matemáticas. Las leyes físicas, sobre las cuales habrán en última instancia de basarse las respuestas, están a su vez expresadas por intermedio de tales operaciones matemáticas. Así pues, nos estamos preguntando cuál es la forma definitiva en que pueden ser aplicadas las leyes físicas, dadas las restricciones impuestas por el universo que las propias leyes describen.

Ciencia y sociedad

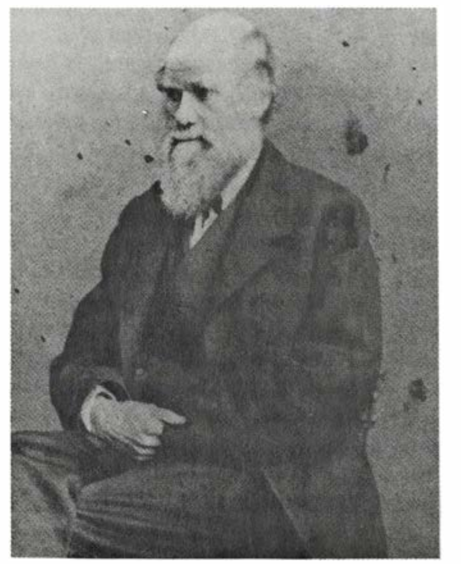
Darwin, tridimensional

En 1864, cinco años después de la publicación de *El origen de las especies,* Darwin posó para los estudios de la London Stereoscopic Company, donde le tomaron tres pares de fotografías estereoscópicas. Ese tipo de retratos gozó de gran popularidad en el siglo XIX y, a menudo, se obtenían centenares de copias de ellos; muchos se encuentran aún en colecciones de anticuarios. Los tres que se tomó de Darwin en 1864 los exhibió el Museo Británico en 1909 con motivo del centenario del naturalista. Desgraciadamente, se perdió luego su rastro. Las pesquisas de Gene Kritsky, del College of Mount St. Joseph, de Cincinnati, han reunido ahora uno de los pares, por primera vez desde aquella exposición, y se publican aquí en primicia para España.

Según Kritsky, la mitad derecha del par estereoscópico se encontró en 1977, cuando James W. Valentine, de la Universidad de California en Santa Bárbara, compró una copia de *Descent of Man (La ascendencia del hombre)* en una librería de lance de Shropshire. Debajo de la sobrecubierta del libro Valentine descubrió una postal con el retrato de Darwin. Hasta el año pasado nadie advirtió la importancia del afortunado hallazgo. A principios de 1984, Kritsky identificó como la parte izquierda de un par estereográfico una imagen guardada en el Instituto Hunt de Documentación Botánica, de la Universidad Carnegie-Mellon. Valentine mandó su fotografía a Kritsky y éste la montó junto a una copia de la del Instituto Hunt. "La figura de Darwin saltó de la página", comenta Kritsky.

Para lograr el efecto estereoscópico, acerque la página a su nariz y mire simultáneamente cada elemento del par con un solo ojo durante un minuto. Luego, manteniendo fija la mirada, aleje lentamente la página hasta que ésta diste unos 25 centímetros de la cara. Corrija levemente la posición de la página hasta que las dos imágenes parezcan fundirse. Si le cuesta fundir las imágenes, ayúdese de una cartulina: manténgala vertical, contra la nariz, de modo que un ojo no vea el campo de visión del otro. Procure que la luz se reparta por igual en ambos lados, sin que se proyecten sombras. En muchos comercios pueden adquirirse, por poco dinero, lupas binoculares estereoscópicas.

Está convencido Kritsky de que quedan por descubrir muchos otros pares estereoscópicos y otras fotografías no catalogadas de Darwin.



Charles Darwin en un par estereoscópico de 1864

Con el corazón negro

¿Qué hay en el centro de nuestra galaxia? Nubes de polvo ocultan a la vista esa región, y, las observaciones en frecuencias de radio, si bien ofrecen un cuadro general de estructuras radioemisoras, poco informan de su dinámica. Un grupo de físicos y astrónomos de la Universidad de California en Berkeley, liderados por Charles H. Townes y Reinhard Genzel, acaban de efectuar observaciones espectroscópicas muy precisas en las bandas del infrarrojo e infrarrojo lejano. Señalan los datos que, en el corazón de la galaxia, gas y polvo se encuentran unidos gravitatoriamente por un objeto central puntual de gran masa, casi con seguridad un agujero negro.

Los científicos de Berkeley, que exponen en *Nature* sus hallazgos, emplearon espectrómetros de nuevo diseño para examinar una región de gas caliente y rarificado que se proyectaba unos 5,5 años-luz del centro de la galaxia, además de un disco de gas y polvo neutro, frío, que se extendía decenas de años-luz más allá de la cavidad ionizada. Su objetivo consistía en determinar el patrón de velocidades del gas y el polvo; al efecto midieron los desplazamientos Doppler del espectro de emisión de neón (para el gas ionizado) y los espectros de oxígeno, carbono y monóxido de carbono (para el disco neutro). Se producen esos desplazamientos espectrales cuando una fuente de radiación se aleja o acerca al observador.

Las velocidades estimadas muestran que el gas y el polvo se mantienen en órbita alrededor del centro de la galaxia por la atracción gravitatoria que ejerce una masa unos cuatro millones de veces superior a la del Sol. La velocidad orbital de la materia interestelar decrece con la distancia al centro de la galaxia; el descenso es característico de velocidades orbitales de los sistemas en los que la masa central se apiña en un punto.

El hallazgo de una gran masa muy compacta abona la idea de que se trata de un agujero negro. También podría ser la masa central un cúmulo estelar, donde se encontrarían dispersos el gas y polvo observados; pero en los cúmulos habituales la velocidad de la materia que orbita alrededor del centro no aminora con la distancia. Podría producir ese gradiente de velocidades un cúmulo atípico, en el que la mayoría de estrellas se encontrasen densamente empaquetadas en el núcleo. No obstante, las estimaciones de la concentración de estrellas en el centro galáctico se sitúan muy por debajo de la densidad requerida.

Un agujero negro no sólo explicaría las velocidades registradas, sino también un reciente cataclismo del centro de la galaxia: la baja densidad del centro galáctico y la turbulencia del gas en-

volvente. Estiman los autores que una cantidad de gas y polvo del orden de una diezmilésima o milésima parte de la solar se precipita cada año en el agujero negro, liberando una considerable cantidad de energía a medida que se acelera y caldea. El cálculo de la liberación de energía arroja valores muy superiores a los que en la actualidad manan de esa región, lo que viene a sugerir que la caída generadora de energía es un fenómeno episódico. Quizá la cavidad y la turbulencia constituyan reliquias de un estallido registrado en el último millón de años, cuando un gran acúmulo de material se precipitó en el agujero negro.

Apunta también la existencia de un agujero negro en el centro de la galaxia, probablemente, aunque no necesariamente, el mismo que dirige los movimientos del gas y el polvo, un reciente estudio de radio de esa zona. Kwok-Yung Lo, del Instituto de Tecnología de California, Donald C. Backer, de Berkeley, y sus colegas emplearon técnicas de interferometría de muy larga base, así como receptores de radio extremadamente sensibles, para establecer un límite superior al diámetro de una potente fuente de radio situada en el centro de la cavidad ionizada: alrededor de 20 unidades astronómicas, esto es, 20 veces la distancia de la Tierra al Sol. La fuente, por tanto, se aproxima al tamaño de las estrellas, pero las fuentes estelares conocidas no encajan con sus características.

Retrovacuna y SIDA

La puesta a la venta en algunos países de una vacuna contra una enfermedad de los felinos que guarda cierto paralelismo con el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA) quizá contribuya a la prevención de ese mal letal que hoy se propaga impune.

La vacuna inmuniza a los gatos frente a una forma de virus de la leucemia felina (FeLV). Igual que en el caso del HTVL-III, el agente infeccioso del SIDA, FeLV es un retrovirus. Estos microorganismos, que insertan su propio material genético en el genoma de su hospedador, provocan diversos tumores en animales y una forma de cáncer en humanos. La vacuna contra FELV, que elaboran los laboratorios Norden, constituye la primera vacuna eficaz contra un retrovirus.

El FeLV infecta del uno al tres por ciento de los gatos domésticos; en las casas donde hay más de un gato, la incidencia es del 30 por ciento. La partícula vírica consta de una cápside de proteína que rodea un denso núcleo, donde se halla la molécula de material genético, en este caso ARN. Una vez introducido en la célula hospedadora, una enzima vírica se sirve del ARN como modelo para obtener una molécula de ADN (lo que constituye una inversión del proceso habitual de transcripción). El ADN se inserta en uno o más de los cromosomas de la célula hospedadora. Simultáneamente, el virus usurpa la maquinaria de elaboración de proteínas de la célula infectada que, a partir de entonces, fabrica nuevas partículas víricas.

Pese al nombre del virus, pocos son los gatos que mueren de leucemia. Pero puede ser letal por otras causas. En combinación con otros genes, el ADN vírico puede producir tumores. Por otra parte, la proteína de la cubierta vírica denominada *p15E* suprime la respuesta inmunológica del felino. Como las víctimas del SIDA, los gatos infectados por FeLV mueren a menudo de infecciones oportunistas.

La vacuna se debe a los trabajos de Richard G. Olsen, de la Universidad estatal de Ohio. Olsen trabajaba con una línea celular denominada FL-74, que deriva de un tumor provocado por FeLV. Habitualmente, las células FL-74 contienen partículas víricas virulentas intactas; sin embargo, Olsen advirtió que, si se transferían células tumorales a un medio pobre después de haberlas cultivado en otro rico, desprendían antígenos víricos (proteínas) y antígenos tumorales, pero no partículas víricas vivas. Así, la vacuna protegía frente a la formación de tumores y la infección vírica sin provocar infección ni instar el crecimiento tumoral.

Es más, las células FL-74 no liberan formas activas de *p15E,* de modo que la vacuna no suprime la respuesta inmune. En ese sentido, hace lo que cabría esperar de una vacuna anti-SIDA. En efecto, Jeffrey Laurence, del Hospital Clínico de la Universidad de Cornell, señala que el proceso global de infección de FeLV proporciona "un buen modelo" del SIDA. Advierte Laurence, sin embargo, que los datos obtenidos de la formulación de la vacuna felina no son de aplicación directa a la investigación acometida en busca de una urgente vacuna anti-SIDA, en la que participan varios laboratorios. El HTLV-III suprime la función inmune mediante un mecanismo mucho más complejo que el del FeLV. Por añadidura, el patógeno del SIDA muestra una tasa de mutación mucho mayor que el virus de los felinos, lo que quizá le permitiría variar sus antígenos y eludir el efecto de la vacuna.

La evolución del darwinismo

La teoría sintética, que durante los últimos cuarenta años ha constituido el modelo evolutivo comúnmente aceptado, se modifica y amplía gradualmente, al compás de los descubrimientos de la biología molecular y la paleontología

G. Ledyard Stebbins y Francisco J. Ayala

Cuando los biólogos mencionan hoy la teoría de la evolución, no suelen referirse a su formulación original, tal y como la concibió Charles Darwin, sino a la versión corregida y aumentada del darwinismo conformada en los años 30 y 40 de este siglo. Esta última, que recibió en principio el nombre de neodarwinismo y, más adelante, el de teoría sintética, consolidó los principios fundamentales del darwinismo: la evolución tiene lugar por selección natural de las diferencias hereditarias que surgen aleatoriamente en cada generación, de manera que aquellas que confieren a sus portadores una mayor adaptación al medio se multiplicarán y, las perjudiciales, se eliminarán. Al igual que el darwinismo, la teoría sintética pone de relieve la naturaleza oportunista de la evolución por selección natural, en cuanto que las diferencias aludidas se generan por azar y son seleccionadas en respuesta a las exigencias del medio, y, por otra parte, postula la condición gradual de ese proceso.

Los creadores de la teoría sintética, entre los que se cuentan el genético Theodosius Dobzhansky, el biogeógrafo y sistemático Ernst Mayr, el paleontólogo George Gaylord Simpson, el biólogo Julian Huxley y uno de los autores (Stebbins), añadieron nuevos elementos a los fundamentos darwinistas. Así, la genética facultó identificar en términos de genes (esto es, unidades de información hereditaria que controlan estructura, desarrollo y función) los elementos determinantes de los atributos sobre los que la selección natural actúa.

Por otra parte, se comprobó que la variabilidad de los caracteres obedece a mutaciones, es decir, alteraciones permanentes de los genes que aparecen aleatoriamente. Por su parte, la biología de poblaciones destacó en la teoría sintética la importancia que la estructura y distribución poblacionales tienen en la aparición de especies nuevas. La teoría sintética incorporó igualmente el concepto biológico de especie que, a la hora de distinguir unas de otras, da más trascendencia al aislamiento reproductor (la incapacidad de hibridación interespecífica) que a las diferencias observables. Aunque algunos biólogos se resistieron inicialmente a aceptar la teoría sintética, la inmensa mayoría de los evolucionistas la ha tenido durante cuatro décadas por la mejor explicación de los procesos evolutivos y, por ello, ha pasado a ocupar un puesto central en la biología.

La teoría sintética ha tenido que afrontar los descubrimientos llevados a cabo durante las décadas de los años 70 y 80. La explosión investigadora sobre la estructura del ADN (portador de la información genética) ha permitido a los biólogos el estudio en el nivel molecular de los mecanismos evolutivos y los trabajos resultantes han contribuido tanto a la ampliación de la teoría sintética como el descubrimiento de los genes al darwinismo.

Los estudios moleculares han dado pie a dos enfrentamientos directos con la teoría sintética. Uno se basa en la propuesta de que la aparición de variantes de ADN pueda deberse en mayor grado a cierto determinismo molecular que al puro azar. El otro, denominado teoría neutralista, se basa en la pretensión, contraria a la anterior, de que el azar no sólo establece la aparición inicial de las variantes genéticas, sino también su posterior destino en la población. De la paleontología ha surgido un desafío de otra índole, fundamentado en una interpretación distinta del registro fósil, que ha recibido el nombre de teoría del equilibrio puntuado, en la que se mantiene que la evolución no procede gradualmente, sino de manera irregular, a saltos y con convulsiones.

Para empezar, es de justicia dejar bien claro que, a diferencia de los ataques provenientes de creacionistas u otros grupos acientíficos, ninguna de las posturas alternativas aludidas niega que el cambio evolutivo ocurra, es decir, que las especies actuales desciendan de antepasados comunes, ni tampoco rechazan la importancia de la selección natural darwinista en este proceso. Estas disputas no pasan de ser conflictos de matiz y opinión dentro de una visión evolutiva común. Es más, estamos convencidos de que modificando tanto la postura tradicional como las teorías competidoras, la mayoría de los desacuerdos pueden encajarse en una versión más amplia de la teoría sintética.

Evolución molecular

Las innovaciones más radicales del pensamiento evolucionista proceden de la reciente adquisición de conocimientos de los procesos genéticos en el nivel molecular, por más que muchas de las implicaciones evolutivas de esos descubrimientos sigan siendo imprecisas. Las rutas moleculares que van desde los genes hasta los caracteres observables son largas, complejas y, en gran parte, ignotas. Hasta que no se conozca mejor la relación existente en términos moleculares entre genes y desarrollo, no se podrá valorar en su totalidad el influjo

1. EVOLUCION EN MOSAICO, ejemplificada por un fósil de *Archeopteryx*, especie que vivió hace unos 150 millones de años y que se considera de transición entre los dinosaurios y las aves. A pesar de que *Archeopteryx* ocupa, en cuanto especie, una posición intermedia, sus características, consideradas individualmente, no tienen carácter transitivo, mostrando, al mismo tiempo, un esqueleto semejante al de los dinosaurios y plumas muy parecidas a las de las aves actuales. La teoría sintética de la evolución se ha enriquecido recientemente con la adopción del concepto de evolución en mosaico, que mantiene que el ritmo de evolución de distintos atributos puede diferir, al estar sometidos a distintas presiones selectivas.

de la biología molecular en la teoría evolucionista.

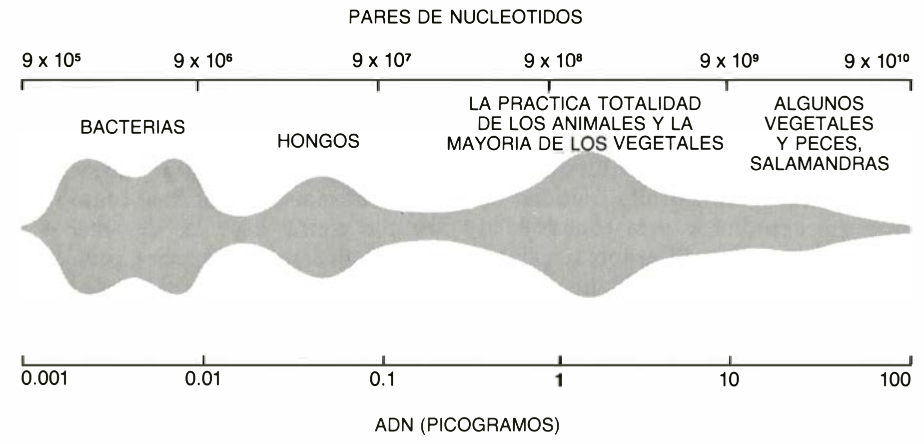
Sin embargo, algunas consecuencias de hallazgos recientes son ya evidentes hoy, habiéndose puesto así de manifiesto que la variación genética es mucho más intrincada de lo que se pensaba, no sólo en lo que respecta a los fenómenos de mutación génica, sino también en lo que toca a los cambios experimentados por los genes en su número y configuración. Hoy sabemos que tanto la mutación como los cambios estructurales no sólo afectan a genes, sino también a secuencias de ADN que no pueden recibir la consideración de tales, puesto que no codifican proteínas. Aunque la moderna biología molecular ha hecho más complejo el concepto tradicional de variación genética, también puede decirse que ha reforzado la teoría sintética, al identificar los mecanismos responsables de muchos procesos que dicha teoría propone. En el nivel molecular, el significado de la evolución está comenzando a esclarecerse; hoy resulta posible, por ejemplo, dar respuestas provisionales a la pregunta de cómo surgen genes nuevos.

La importancia que en el proceso evolutivo tiene la formación de genes nuevos frente a la modificación de los anteriores se pone de manifiesto en la relación existente entre la cantidad de material hereditario y la complejidad de los organismos. El genoma, o dotación hereditaria, de un virus oscila entre 1300 y 20.000 pares de nucleótidos (pn), subunidades del ADN que se acoplan en parejas para formar las dos hebras de la doble hélice. El genoma promedio de una bacteria consta de unos cuatro millones de pn. Entre los eucariotas (organismos con núcleo celular diferenciado), los hongos tienen de 10 a 20 millones de pn por célula, mientras que en la mayoría de los animales y vegetales ese número asciende a varios miles de millones.

La relación entre la cantidad de ADN de un organismo y su complejidad, o su patrón de desarrollo, dista de ser precisa. En unos pocos grupos de plantas superiores, salamandras y algún pez primitivo, la dosis asciende a unos 10^{10} pn por célula, muy superior a la de la mayoría de los mamíferos. Los mayores acopios de ADN (del orden de 10^{12} pn por célula) corresponden a eucariotas cuyas estructura y desarrollo son relativamente sencillos, como ocurre con ciertas especies de amebas y con los *Psilopsida,* especies primitivas próximas a los helechos. Algunos genes de esas especies aparecen repetidos miles de veces, y lo mismo ocurre con largos fragmentos de ADN que no codifican proteínas y que, por tanto, no pueden considerarse genes.

De hecho, sorprende el gran número de segmentos de ADN de función desconocida que han aparecido. En el genoma humano existe una secuencia, denominada *Alu,* que consta de 300 pn y que se presenta repetida unas 300.000 veces, lo cual equivale al tres por ciento del ADN humano; en el genoma del ratón también se ha encontrado un breve segmento de unos 100 pn que se reproduce cerca de un millón de veces. El descubrimiento de esas reiteracio-





2. LA CANTIDAD DE ADN POR CELULA aumenta más o menos en proporción a la complejidad del organismo. En el diagrama se representa la cantidad de material genético (ADN) en picogramos (10^{-12} gramos) y en número de pares de nucleótidos (unidades químicas de la molécula de ADN de doble cadena). La anchura del diagrama en cada punto se corresponde aproximadamente con el número de especies que portan ese peso de ácido nucleico; muestra que la mayoría de las especies de cada grupo posee una cantidad semejante de ADN por célula. En la parte derecha del diagrama se encuentra una clase excepcional en cuanto a la relación general existente entre ADN y complejidad; comprende organismos menos complejos cuya dotación de ADN es extremadamente elevada. Entre ellos se cuentan ciertas plantas con semillas, las salamandras y algunos peces primitivos, como el esturión, el celacanto y el *Lepisosteus*.

nes, aparentemente sin sentido alguno, condujo a especular con la idea de que parte de la evolución molecular fuera determinista y siguiera una dirección independiente tanto del azar como de la selección natural. Se ha propuesto que esas secuencias no deben su multiplicación al azar, sino a una cierta deriva molecular que impulsa a cada una de ellas a reproducirse en el genoma. No obstante, el análisis mediante modelos matemáticos indica que los conceptos tradicionales de evolución son suficientes para explicar la proliferación de tales segmentos.

A pesar de las excepciones que hemos mencionado, y al margen de la fracción del ADN cuya secuencia de bases no tiene sentido, la cantidad de información genética por célula aumenta gradualmente de las bacterias a los hongos y de éstos a las plantas y animales superiores. El gen típico consta de unos mil nucleótidos, cuya correcta ordenación es tan crucial como la de las letras de una frase. Dado que no es posible que una secuencia aleatoria de mil letras tenga sentido, debiendo estar ordenada para poder transmitir información, ¿cómo es posible que se hayan acumulado secuencias de ADN con sentido en el transcurso de la evolución?

La poliploidía es una de las formas por las que la dotación génica de los organismos puede incrementarse súbitamente: mediante duplicación del número de cromosomas al pasar de una generación a la siguiente, se produce una descendencia generalmente aislada en lo reproductor de sus parentales y que, en realidad, constituye una nueva especie [véase "Cataclysmic Evolution", por G. Ledyard Stebbins, Jr.; SCIENTIFIC AMERICAN, abril de 1951]. Ciertos organismos cuya dotación de ADN es muy elevada, por ejemplo *Psilopsida,* son poliploides. De hecho, cerca del 47 por ciento de las plantas con flores lo son, contándose entre ellas especies cultivadas como la patata, el fresón y el trigo. Sin embargo, muchas plantas y animales superiores no son poliploides, y la poliploidía per se no pasa de ser un mecanismo de multiplicación de los genes existentes que nada explica de su origen.

Genes nuevos

Uno de los procesos que originan genes totalmente nuevos es el de multiplicación en tándem de una breve secuencia de nucleótidos a lo largo de la historia evolutiva. La multiplicación en tándem consiste en la repetición de una secuencia en posiciones adyacentes a lo largo de un mismo cromosoma. Tal multiplicación dase al aparearse los cromosomas homólogos durante la meiosis, esto es, a lo largo de la división celular cuyo resultado es la formación de gametos o células sexuales. En ciertas ocasiones puede producirse un intercambio de segmentos entre los cromosomas que se aparean y, si el acoplamiento no es perfecto, la permuta puede dar lugar a que uno de los cromosomas implicados sea portador de una secuencia repetida que, por tratarse de una célula sexual, se transmitirá al genoma de la generación siguiente.

En algunos casos, la propia estructura del gen revela que se ha originado por multiplicación en tándem, como ocurre con el colágeno α2(I) de las gallinas. El colágeno es la principal proteína estructural del hueso, del cartílago, del tejido conectivo y de la piel de los vertebrados. El gen α2(I) de las gallinas comprende unos 38.000 pn y está formado por más de 50 exones, esto es, secuencias discretas de ADN que codifican proteínas, separadas unas de otras por intrones, o secuencias intercaladas que no codifican proteínas. Los exones son, en este caso, secuencias compuestas por repeticiones de una misma unidad que consta de nueve nucleótidos. Aunque las repeticiones difieren algo entre sí en su composición nucleotídica, su origen común se manifiesta en que el triplete de aminoácidos que codifica cada secuencia lleva siempre glicina en la posición inicial y prolina en una de las dos restantes.

La historia evolutiva de un gen puede reconstruirse a partir de su estructura. Así, una serie de cinco repeticiones en tándem de la secuencia ancestral de nueve pn dio lugar a un exón de 54 pn y, a continuación, ese exón básico se multiplicó unas 50 veces. Las repeticiones han producido algunos exones cuyo número de nucleótidos difiere de 54, pero siempre es un múltiplo de nueve. Debido a la recurrencia de la secuencia de nueve pn en cada exón, el apareamiento de los cromosomas en la meiosis es a veces anómalo, de manera que los exones homólogos no coinciden, sino que se imbrican unos sobre otros, siendo el grado de imbricación un múltiplo de nueve, lo cual lleva consigo que los segmentos que se intercambian entre cromosomas posean un número distinto de nucleótidos.

Susumu Ohno y colaboradores, del Centro Médico City of Hope, han descubierto el origen común de algunos de los genes que codifican las inmunoglobulinas, moléculas de anticuerpos, de los ratones. Las inmunoglobulinas son proteínas formadas por dos cadenas polipeptídicas largas ("pesadas") y otras dos más cortas ("ligeras"). La secuencia de nucleótidos de un segmento de cada cadena, bien sea larga o corta, es prácticamente fija, mientras que la composición del resto es extremadamente variada, de forma que las combinaciones posibles en la fracción variable dan lugar a la enorme diversidad de anticuerpos cuya función es proteger a los mamíferos frente a sustancias extrañas.

Ohno y sus colegas han descubierto

que los genes que codifican el segmento variable de la cadena larga de la inmunoglobulina, compuesto por unos 600 pn, han evolucionado a partir de un gen ancestral común que, a su vez, proviene de una secuencia original de 48 pn que ha sufrido 12 repeticiones en tándem. Posteriores análisis demostraron que la fracción de 48 pn está formada por una asociación de tres segmentos de 14, 21 y 15 pn. Aunque en el transcurso de la historia evolutiva la secuencia de esos tres segmentos se ha modificado por mutación puntual, aún muestran la suficiente semejanza para que de ella pueda inferirse que constituyen el resultado de una triplicación en tándem de una secuencia primitiva aún más breve.

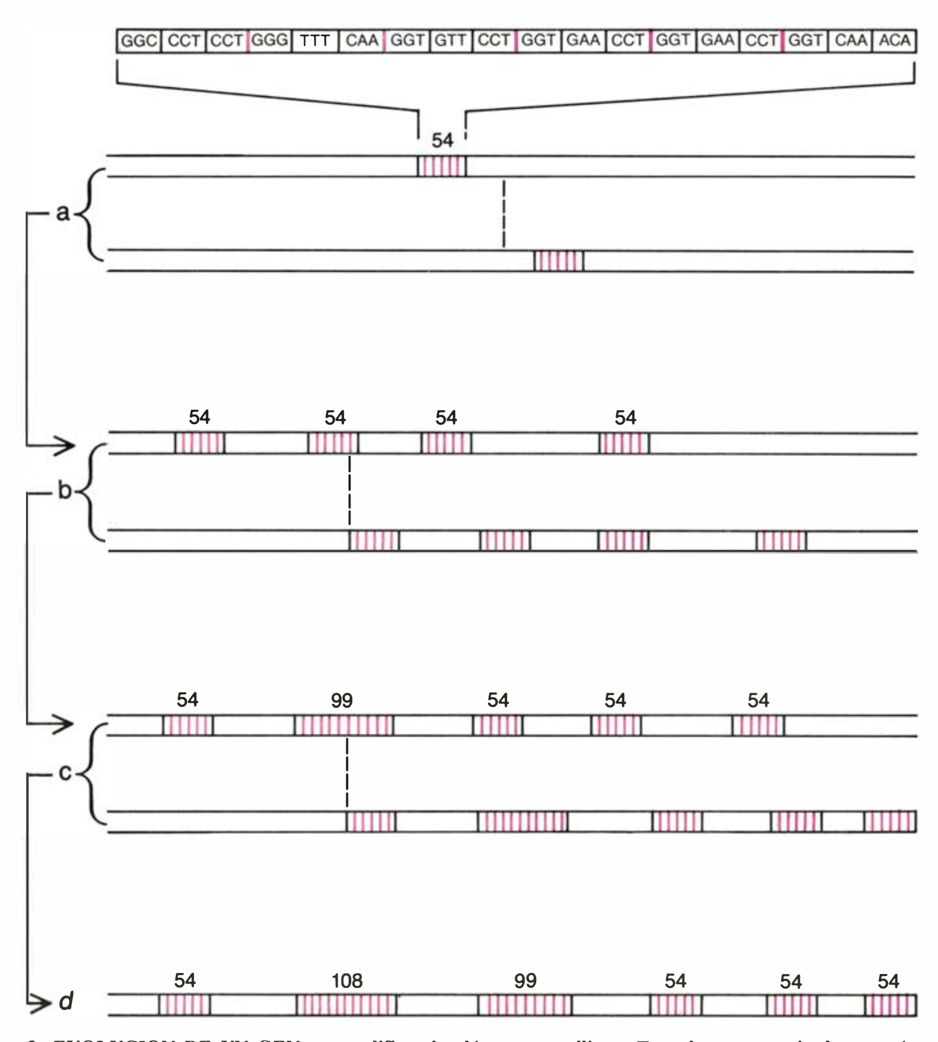
El gen que codifica el segmento de composición constante de la cadena larga de hemoglobina revela una historia evolutiva que, aunque distinta, puede ser igualmente común. El segmento contiene tres dominios proteicos con funciones diferentes. Uno de ellos interactúa con las superficies celulares, otro activa el complemento (grupo de proteínas que destruyen células extrañas) y un tercero constituye el punto de unión con la cadena corta. Además, la cadena larga consta de un cuarto segmento, o región bisagra, que separa la molécula en dos partes. Cada exón del gen codifica uno de los cuatro componentes de la cadena polipeptídica, lo cual sugiere que cada uno representa un pequeño gen primitivo que en tiempos codificaba un polipéptido independiente dotado de una función ancestral de la del actual compuesto proteico.

Duplicación génica

En los casos mencionados anteriormente, varios genes se han unido para formar uno nuevo; en otros casos, un único gen, complejo, ha producido otros varios por duplicación. Al igual que sucede con la multiplicación en tándem de secuencias cortas de ADN, este proceso probablemente ocurra durante el intercambio de segmentos entre cromosomas homólogos en la meiosis. El gen original y el duplicado pueden conservar la misma función o, por el contrario, uno de ellos mantiene la función original y el otro adquiere evolutivamente una función distinta, aunque relacionada. Incluso antes de que se comenzaran a utilizar las técnicas de ADN recombinante, se sabía ya que un gen ancestral podía dar origen por duplicación total a genes emparentados, ya que las secuencias de aminoácidos de proteínas de grupos próximos proporcionaban pruebas incontrovertibles de la ascendencia común de los genes que las codificaban. Por ejemplo, los genes de la globina, que codifican los cuatro polipéptidos que componen las moléculas de la hemoglobina humana, constituyen un grupo que, sin duda, se ha originado de esta manera.

Estos últimos genes conservan distintos grados de semejanza a partir de los fenómenos de duplicación de donde proceden. En otro orden de procesos evolutivos un gen duplicado puede divergir libremente del original por ser superfluo y, en consecuencia, no estar sujeto a las restricciones impuestas por la selección natural. Se comenzaron a conocer ejemplos de estos casos cuando pudo determinarse la secuencia del ADN de los genes de la globina. En ella se identificaron pseudogenes, que poseen secuencias homólogas a las de los genes funcionales de los que provienen por duplicación, pero que contienen mutaciones que impiden la traducción a un polipéptido funcional. Tales mutaciones pudieron acumularse al margen de presiones selectivas, pues el organismo retuvo uno de los genes duplicados capaz de desempeñar su función original. Hoy se cree que los pseudogenes son comunes en vertebrados, y quizá también en otros organismos.

Cuando aparecen nuevos genes por duplicación, tanto el gen original como el duplicado suelen transmitirse unidos



3. EVOLUCION DE UN GEN que codifica el colágeno en gallinas. Tuvo lugar a partir de un exón (segmento de gen que codifica aminoácidos), que se multiplicó a lo largo de muchas generaciones. En la parte superior se representa la secuencia de 54 nucleótidos que componen el exón (*A* corresponde al nucleótido adenina, *C* a citosina, *G* a guanina y *T* a timina). El exón está formado por seis series, más o menos semejantes, de nueve nucleótidos cada una. El apareamiento anómalo de cromosomas homólogos durante la meiosis *(a)*, seguido de un intercambio de segmentos cromosómicos en el lugar indicado por la línea discontinua, resulta en un nuevo cromosoma portador de un exón duplicado. El proceso se repitió en el transcurso de la historia evolutiva, produciéndose los cromosomas representados en *b*. Dada la estructura repetitiva del exón, el apareamiento anómalo y el posterior intercambio ocurrieron en varias ocasiones en el interior del aquél, instando la aparición de nuevos exones cuyo número de nucleótidos difiere de 54. Se representan los procesos que originan exones de 99 nucleótidos *(b, c)* y 108 nucleótidos *(c, d)*. Sólo un fragmento del gen actual aparece en el dibujo *(d)*, aun cuando el mismo proceso operó en todo él.

a la descendencia del organismo en el que se produjo la duplicación. Sin embargo, se ha descubierto una variante de ese proceso que constituye uno más de los caminos, al parecer innumerables, que sigue la evolución en el nivel génico. De vez en cuando, el gen original se encuentra en una especie y el duplicado en otra filogenéticamente muy alejada de la anterior. Tal fenómeno se denomina transferencia horizontal del ADN, por cuanto éste pasa de una especie a otra coexistente con ella, en contraposición a la transferencia vertical, en la que la transmisión va de padres a hijos de una misma especie.

El material genético de algunos erizos de mar aporta pruebas en apoyo de la existencia de este proceso. En las diferentes especies de erizos el grado de divergencia de la secuencia de nucleótidos de los genes que codifican las proteínas del grupo de las histonas difiere de unas a otras en un grado aproximadamente proporcional al tiempo transcurrido desde que las especies se separaron en el transcurso de la evolución. No obstante, en la especie *Psammechinus miliaris* los genes que codifican dos histonas, la *H*3 y la *H*4, parecen haber divergido de los correspondientes de especies próximas mucho más lentamente que otros que también codifican histonas. Una de las posibles explicaciones de ese fenómeno postula restricciones selectivas desconocidas, que reducen la tasa de evolución de los genes *H*3 y *H*4 en *Psammechinus* a una fracción de la que han experimentado en otras especies. La hipótesis alternativa mantiene que un grupo de genes codificadores de *H*3 y *H*4 se transfirieron de la especie *Strongylocentrotus drobachensis* a *Psammechinus* hace menos de un millón de años y, desde entonces, la tasa evolutiva del complejo génico original y del duplicado ha sido la usual. Puesto que el último antepasado común de ambas especies de erizos vivió hace alrededor de 65 millones de años, los genes de aquellas histonas que no han sido afectados por la transferencia han divergido mucho más.

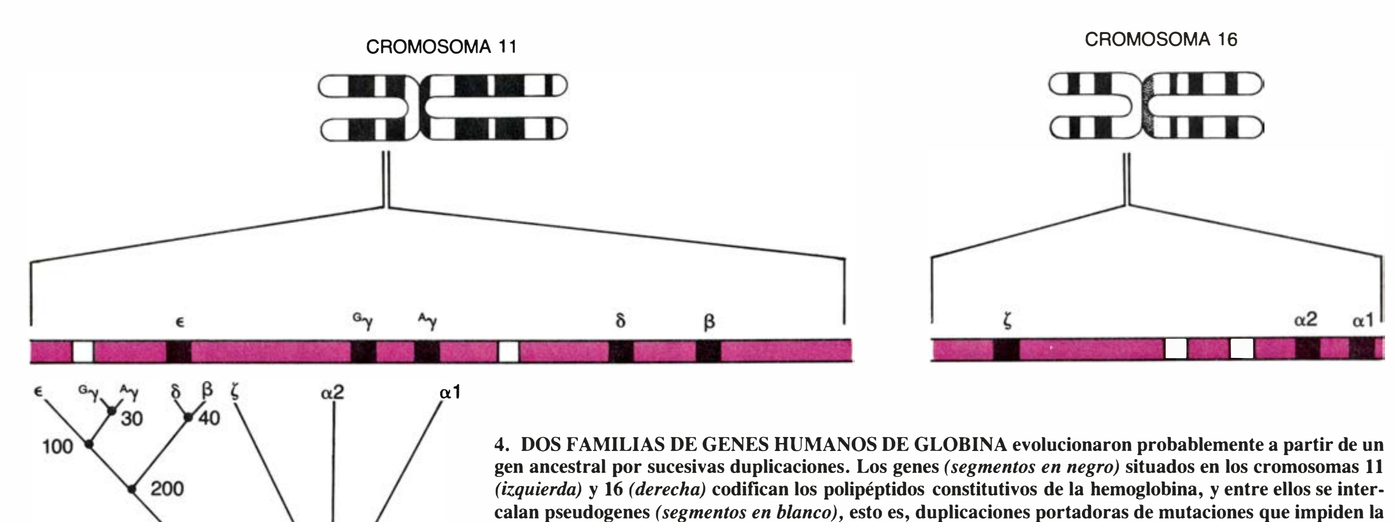
Los mecanismos reales de transferencia génica horizontal se desconocen. Cabe que los agentes sean pequeñas cadenas anulares de ADN llamadas plásmidos, capaces de transportar material hereditario de una célula a otra. Cualquiera que sea el mecanismo implicado, la transferencia horizontal de genes no puede ser frecuente. Los genes de un organismo están coadaptados, esto es, un gen nuevo o modificado será favorecido por la selección natural no sólo por la función que desempeña individualmente, sino también por el grado en que esa función se complementa con la desempeñada por otros genes. Estos, pues, se asemejan a los músicos de una orquesta y, por virtuosos que sean en tanto que solistas, deben ser igualmente capaces de tocar la misma partitura que el resto o, en caso contrario, se producirá un efecto cacofónico. La coadaptación del genoma reduce la incorporación de genes funcionales extraños a la categoría de fenómeno evolutivo raro, si es que ocurre alguna vez.

Variación

La biología molecular ha permitido profundizar no sólo en el estudio del cambio genético temporal, sino también en el prerrequisito de tal evolución, es decir, la variación genética. Los evolucionistas han demostrado que en aquellas poblaciones que ocupan medios idénticos o semejantes, la tasa de evolución es proporcional al grado de variación genética de cada una de ellas [véase "Mecanismos de la evolución", por Francisco J. Ayala; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1978]. Las técnicas de la biología molecular permiten caracterizar la variación genética de una población con mucha mayor facilidad de lo que resultaba factible al formularse la teoría sintética.

A finales de la década de 1960 podía ya valorarse con bastante precisión la magnitud de la variación genética de las poblaciones. Tanto la electroforesis en gel (en la que se introducen las proteínas en un gel con objeto de comparar sus respectivas movilidades en un campo eléctrico) como otras sencillas técnicas, permiten determinar cuántas formas de una proteína existen en una determinada especie y cuáles son sus frecuencias. Tal variación puede expresarse en función del grado de heterocigosis, esto es, de la proporción de loci de un individuo promedio en el que los dos miembros de la pareja de genes, cada uno de ellos procedente de un padre distinto, codifican proteínas diferentes. Varios centenares de especies se han sometido a estudios por electroforesis y otros procedimientos, y la proporción de loci heterocigóticos detectados oscila entre el 5 y el 20 por ciento.

El grado de variación manifestada en esos estudios resultó mucho mayor de lo esperado. Ello se explica en parte porque al distribuirse los diversos alelos (las diferentes formas que adopta

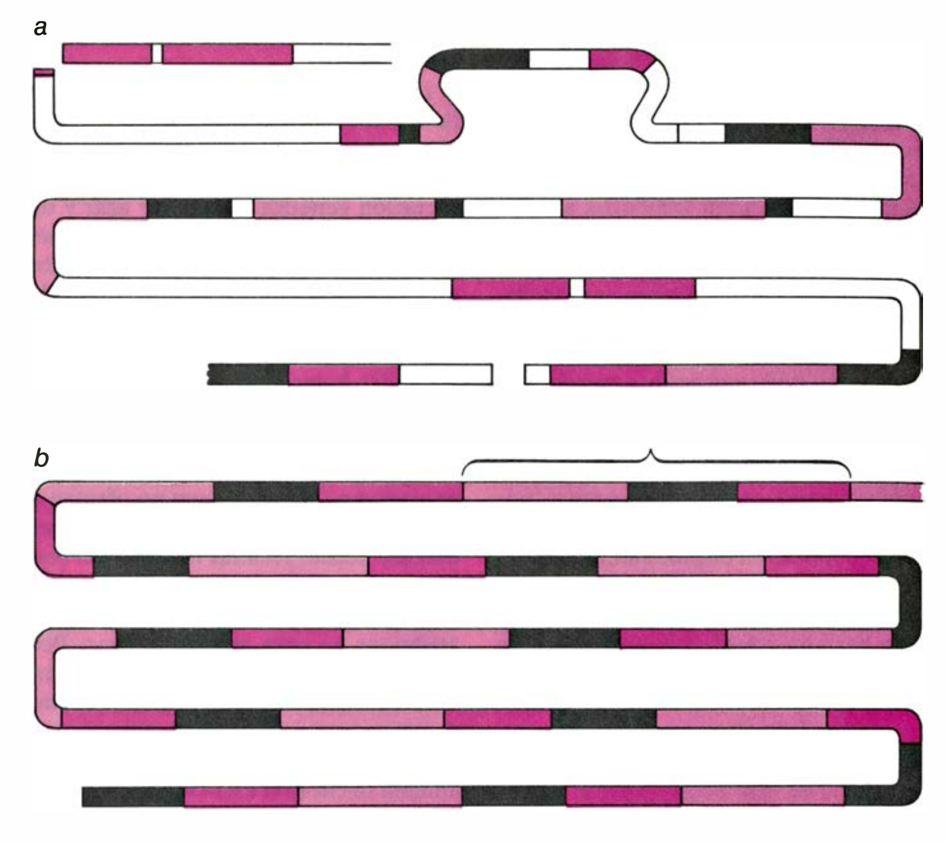


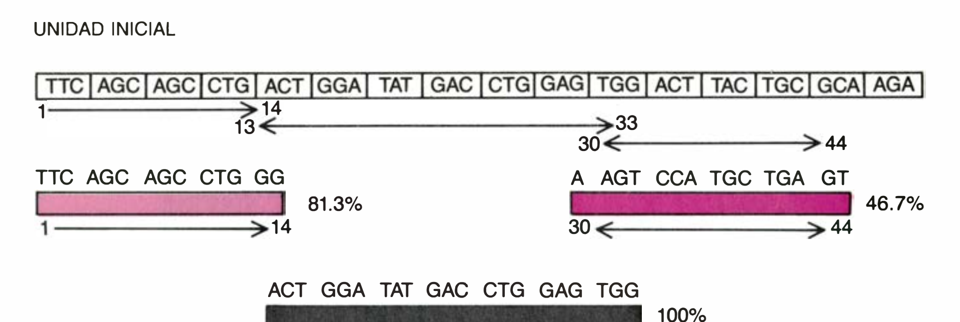
4. DOS FAMILIAS DE GENES HUMANOS DE GLOBINA evolucionaron probablemente a partir de un gen ancestral por sucesivas duplicaciones. Los genes *(segmentos en negro)* situados en los cromosomas 11 *(izquierda)* y 16 *(derecha)* codifican los polipéptidos constitutivos de la hemoglobina, y entre ellos se intercalan pseudogenes *(segmentos en blanco)*, esto es, duplicaciones portadoras de mutaciones que impiden la codificación de un polipéptido funcional. A partir del grado de semejanza entre los genes de la globina y de la historia evolutiva de los organismos en que se encuentran distintas agrupaciones de aquéllos, puede reconstruirse *(izquierda)* el proceso temporal seguido por las duplicaciones. La historia evolutiva de estas familias de genes comenzó hace 500 millones de años, momento en que se duplicó el gen ancestral. Las duplicaciones sucesivas ocurrieron en los instantes indicados. (Los dibujos son de Patricia J. Wynne.)

un gen variable) en gametos durante la meiosis, un individuo heterocigoto en *n* loci puede dar lugar a 2^n tipos distintos de gametos. Un organismo dotado de 10.000 pares de genes que sea heterocigoto en el 10 por ciento de ellos puede producir 2^{1000} gametos diferentes, número que excede en mucho al de átomos del universo.

Es más, el grado de variación genética de una población suele ser mayor de lo que indican los resultados de la electroforesis, dado que esta técnica se basa en la distinta movilidad de las proteínas en un campo eléctrico, y las diferencias de la secuencia de aminoácidos que no se traducen en un cambio de su carga eléctrica neta no siempre se manifiestan. Es más, no todas las diferencias nucleotídicas de la secuencia del ADN dan lugar a proteínas con secuencias distintas, puesto que ciertos tripletos de nucleótidos codifican los mismos aminoácidos, y algunos no codifican ninguno.

Uno de los métodos de detección de la porción de la variación genética que no resulta accesible a la electroforesis ordinaria consiste en digerir cada cadena polipeptídica de una proteína en sus péptidos componentes (secuencias de unos pocos aminoácidos) y, a continuación, comparar individualmente esos péptidos mediante electroforesis o cromatografía. Se ponen así de relieve diferencias de carga eléctrica y otras propiedades que no se manifestaban cuando los péptidos constituían una sola cadena polipeptídica. Uno de nosotros (Ayala) aplicó esa técnica a dos enzimas, la alcohol deshidrogenasa y la superóxido dismutasa, de la mosca del vinagre *Drosophila*. En ambos casos, alrededor de uno de cada diez polipéptidos, que parecían idénticos al someterlos a estudio por electroforesis, se revelaron diferentes en su secuencia de aminoácidos una vez separados en péptidos.





5. LA ESTRUCTURA DE UN GEN informa de su historia evolutiva. En el gen IgV_H del ratón, que codifica un componente de moléculas de anticuerpos, los segmentos del mismo color corresponden a secuencias de ADN que presentan semejanzas estructurales *(a)*. Las interrupciones próximas a los extremos indican puntos de unión con secuencias que no codifican aminoácidos. El bucle corresponde a un intrón, secuencia interna al gen que no codifica. Mediante análisis estadístico, Susumu Ohno y sus colegas, del Centro Médico City of Hope, determinaron la estructura de la secuencia ancestral de ADN *(b)* a partir de la cual evolucionó el gen actual. Esta secuencia constaba de 12 repeticiones de una unidad de ADN *(acotada por la llave)* que, a su vez, comprendía tres subunidades de 14, 21 y 15 nucleótidos. Las semejanzas entre las subunidades, tal y como se observan en el gen actual, sugieren que derivan de la triplicación de un segmento de ADN aún más antiguo. La secuencia de la unidad inicial *(c)* se dedujo a partir de los fragmentos de ella que aún perduran en el gen actual. Las tres subunidades del gen actual se muestran al lado de las secciones correspondientes de la unidad inicial, indicándose el grado de semejanza entre cada subunidad actual y la parte correspondiente en la reconstrucción del gen ancestral.

La teoría neutralista

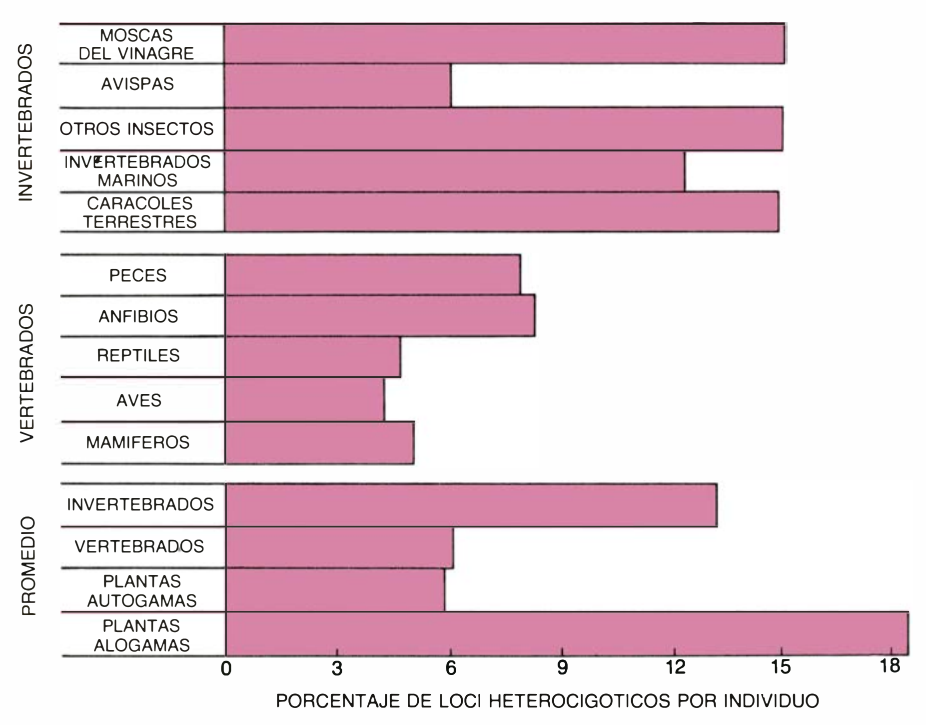
La manera más directa de determinar la variabilidad genética es dilucidar la secuencia de nucleótidos de un mismo gen en diferentes individuos de la misma especie, lo cual sólo se ha conseguido en unas pocas ocasiones. En 1980, dos genes humanos que codificaban la misma hemoglobina fueron secuenciados en el laboratorio de Oliver Smithies, de la Universidad de Wisconsin en Madison. Aunque ambos codificaban el mismo producto, sus secuencias de nucleótidos diferían en el 0,8 por ciento si sólo se tenían en cuenta las sustituciones de un aminoácido por otro, y en un 2,4 por ciento si se incluían en la comparación los aminoácidos presentes en un gen y ausentes en otro. Otros genes, secuenciados en humanos, ratones y moscas del vinagre, han puesto de manifiesto grados de variación semejantes; cabe deducir de ello que, en el nivel de la secuencia de ADN, los organismos quizá sean heterocigotos en casi todos sus loci.

La gran variación revelada por esos estudios constituye uno de los fundamentos de la teoría neutralista, el segundo de los desafíos a la teoría sintética enraizado en la biología molecular. Su principal expositor es Motoo Kimu-

ra, del Instituto Nacional de Genética del Japón [véase "Teoría neutralista de la evolución molecular", por Motoo Kimura; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1980]. Los neutralistas pretenden que si la mayoría de las diferencias genéticas estuvieran sometidas a selección natural (como postula la teoría sintética), la variación observada sería escasa, puesto que las diferencias adaptativas beneficiosas se extenderían por la población y, las desventajosas, se eliminarían. El hallazgo de un considerable grado de variación sugiere a los neutralistas que la mayoría de las diferencias genéticas ni favorecen ni entorpecen la supervivencia de un organismo y, por tanto, que su persistencia o eliminación en una población es puramente materia de azar.

Sin embargo, la magnitud de la variación permite conciliar la pretensión de que la mayor parte de las diferencias entre alelos sea neutral en sus consecuencias adaptativas con la presunción de la teoría sintética, que mantiene la influencia de la selección natural darwiniana. Es tanta la variación en cada generación que, incluso si es en su mayoría neutra, aquella fracción en la que las diferencias tengan un efecto adaptativo proporcionarán abundante materia prima a la fuerza creadora de la selección natural.

La cuestión, pues, no reside en cuál de las dos teorías, neutralismo o selección natural darwiniana, sea correcta, sino en determinar las magnitudes de la variación genética regida por azar y de aquella otra que persiste porque confiere ventajas adaptativas. Por ejemplo, una mutación del tercer nucleótido de un codón (el triplete de nucleótidos que codifica un determinado aminoácido) suele dar lugar a un nuevo codón, que en la traducción es sinónimo del primitivo: el triplete original y el mutante codifican el mismo aminoácido. Estas mutaciones "mudas", que no afectan a la proteína codificada por el gen, pueden, de hecho, resultar neutras con respecto a la adaptación, y las frecuencias que alcanzan en las poblaciones pueden atribuirse en gran medida al azar. Por el contrario, la frecuencia de la mutación causante de la diferencia de un único aminoácido existente entre la hemoglobina normal y la que ocasiona la anemia falciforme está claramente bajo el control de la selección natural. Así, cuando un individuo es homocigoto para el gen de la anemia falciforme, la mutación es fatal; sin embargo, la heterocigosis (posesión de un alelo normal y otro mutante) permite disfrutar de una salud aceptable y confiere una ventaja adaptativa: la resistencia a la malaria.



6. PROMEDIOS DE VARIACION detectados en acervos génicos de especies pertenecientes a distintos grupos de organismos. La variación se mide evaluando, en un individuo promedio, el porcentaje de loci heterocigóticos, es decir, de loci en los que los dos miembros de la pareja de genes difieren en su secuencia de nucleótidos. En general, los invertebrados resultan ser más variables que los vertebrados. Las especies vegetales alógamas (aquéllas en las que los individuos intercambian polen y en las cuales existe, por tanto, transferencia de genes de unas a otras) muestran mayor variación que las plantas que se autopolinizan. Los porcentajes reales de loci heterocigóticos pueden ser algo mayores de lo que indica el diagrama, puesto que la técnica empleada (electroforesis en gel) no logra detectar la totalidad de la variación.

El reloj molecular

La teoría neutralista no sólo se basa en la magnitud de la variación comúnmente existente en una generación determinada, sino también en los descubrimientos efectuados referentes al ritmo de cambio genético experimentado a lo largo de las generaciones. Los estudios en que se relaciona la historia evolutiva común de varias especies con el número de diferencias en las secuencias de ADN, o en las proteínas codificadas por ellas, sugieren que un gen o proteína dados pueden considerarse relojes moleculares, puesto que su tasa de evolución es relativamente constante a lo largo de períodos largos, y toma valores semejantes en distintas especies.

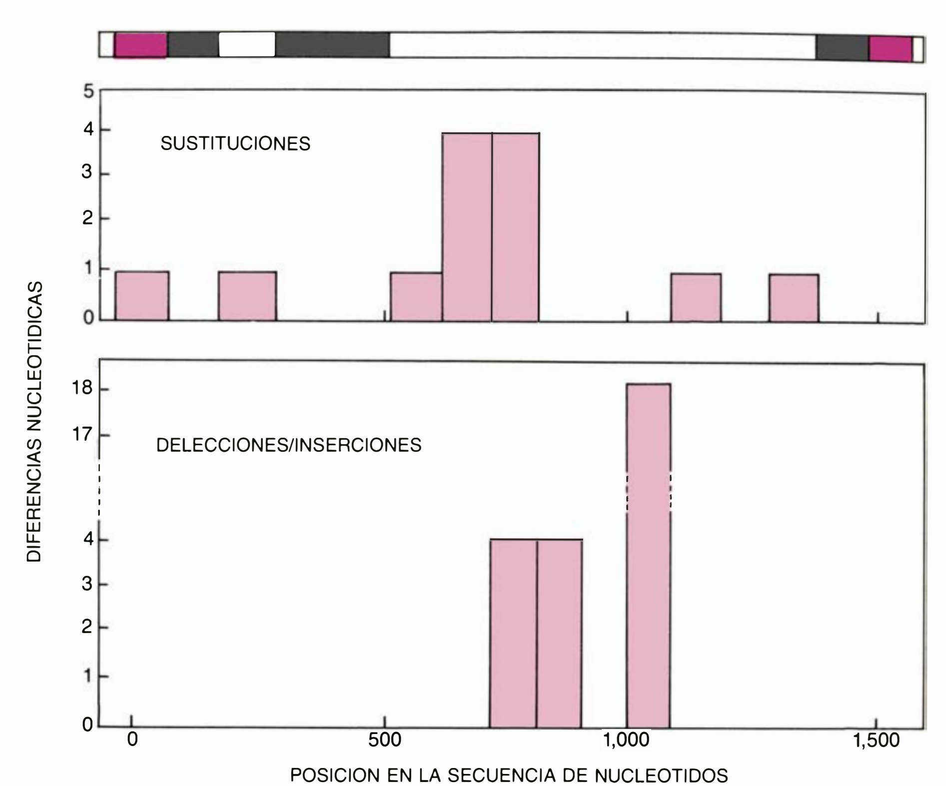
Los neutralistas postulan que esta aparente constancia es incompatible con la noción de que el cambio molecular refleja la actividad de la selección natural. Mantienen que de la teoría sintética cabe esperar tasas variables de evolución molecular, puesto que la intensidad de las presiones selectivas debe variar temporalmente y de una especie a otra. También opinan que la mejor justificación de la existencia del reloj molecular reside en aceptar que las variaciones se incorporan aleatoriamente al acervo genético de la especie, puesto que así el proceso tendrá lugar siguiendo un ritmo más o menos constante.

La teoría sintética, sin embargo, no obliga a que el ritmo de evolución sea tan irregular como suponen sus críticos. En tanto que la función de un gen, o de una proteína, sea la misma en diferentes linajes evolutivos, no tiene por qué sorprendernos que evolucione con ritmos semejantes durante millones de años, ya que las restricciones funcionales a que está sometido serán parecidas. Las histonas evolucionan muy lentamente, pues son proteínas que proporcionan soporte estructural al ADN y, por ello, un cambio considerable de su composición en aminoácidos iría en detrimento de su función. Los fibrinopéptidos, sustancias relacionadas con la coagulación de la sangre, evolucionan mucho más rápidamente, pues no están sometidos a limitaciones tan estrictas, y porque el proceso de coagulación varía a menudo en respuesta a cambios ambientales. Las restricciones evolutivas a que están

sujetas la mayoría de las moléculas se sitúan entre estas dos situaciones extremas.

La persistencia temporal de los ritmos de evolución molecular también es susceptible de acomodación a la teoría sintética. El número de sustituciones de nucleótidos o aminoácidos puede ser mayor en un determinado intervalo, como consecuencia de la selección natural, en particular cuando un linaje evolutivo se está adaptando a un nuevo medio, lo cual requiere cambios simultáneos de muchas funciones. El propio azar, en algunas instancias, puede dar lugar a incrementos súbitos del ritmo de cambio genético: cuando el censo de una especie experimenta reducciones drásticas, la clase de variaciones genéticas cuasineutras de que son portadores los supervivientes puede llegar a preponderar en el acervo genético de la población.

Sin embargo, aunque la función fundamental de un gen o proteína no cambie en el transcurso de la evolución, no hay razón alguna para esperar que las fluctuaciones experimentadas por su ritmo evolutivo sean frecuentes o dilatadas. Los enormes espacios de tiempo a lo largo de los cuales se calculan los ritmos de evolución molecular hacen que las fluctuaciones se compensen unas con otras, produciéndose así la aparente constancia de aquéllas. John Gillespie, de la Universidad de California en Davis, ha elaborado modelos matemáticos en los que se demuestra que la existencia de un reloj molecular es compatible con la suposición de que la evolución molecular esté regida por selección natural.



7. DIFERENCIAS NUCLEOTIDICAS detectadas al comparar la secuencia del ADN del gen de la globina $^{A}\gamma$ en dos humanos. En la parte superior se representan los componentes del gen: secuencias terminales de ADN *(color)* que no codifican aminoácidos, pero que contienen instrucciones que rigen la transcripción del gen, exones *(gris)* e intrones *(blanco)*. Los diagramas de barras indican el tipo, número y posición de las diferencias de nucleótidos en el gen. En una sustitución los nucleótidos que ocupan cierta posición en la secuencia de ADN son distintos; en una deleción, o inserción, el nucleótido presente en una variante del gen está ausente en otra. El mayor número de diferencias se da en los intrones, en los que los cambios debidos a mutación no afectan a la secuencia de aminoácidos codificada por el gen y pueden, por tanto, acumularse sin experimentar mayores restricciones por parte de la selección natural. Los exones no presentan diferencias en sus nucleótidos: el gen es funcionalmente idéntico en ambos individuos.

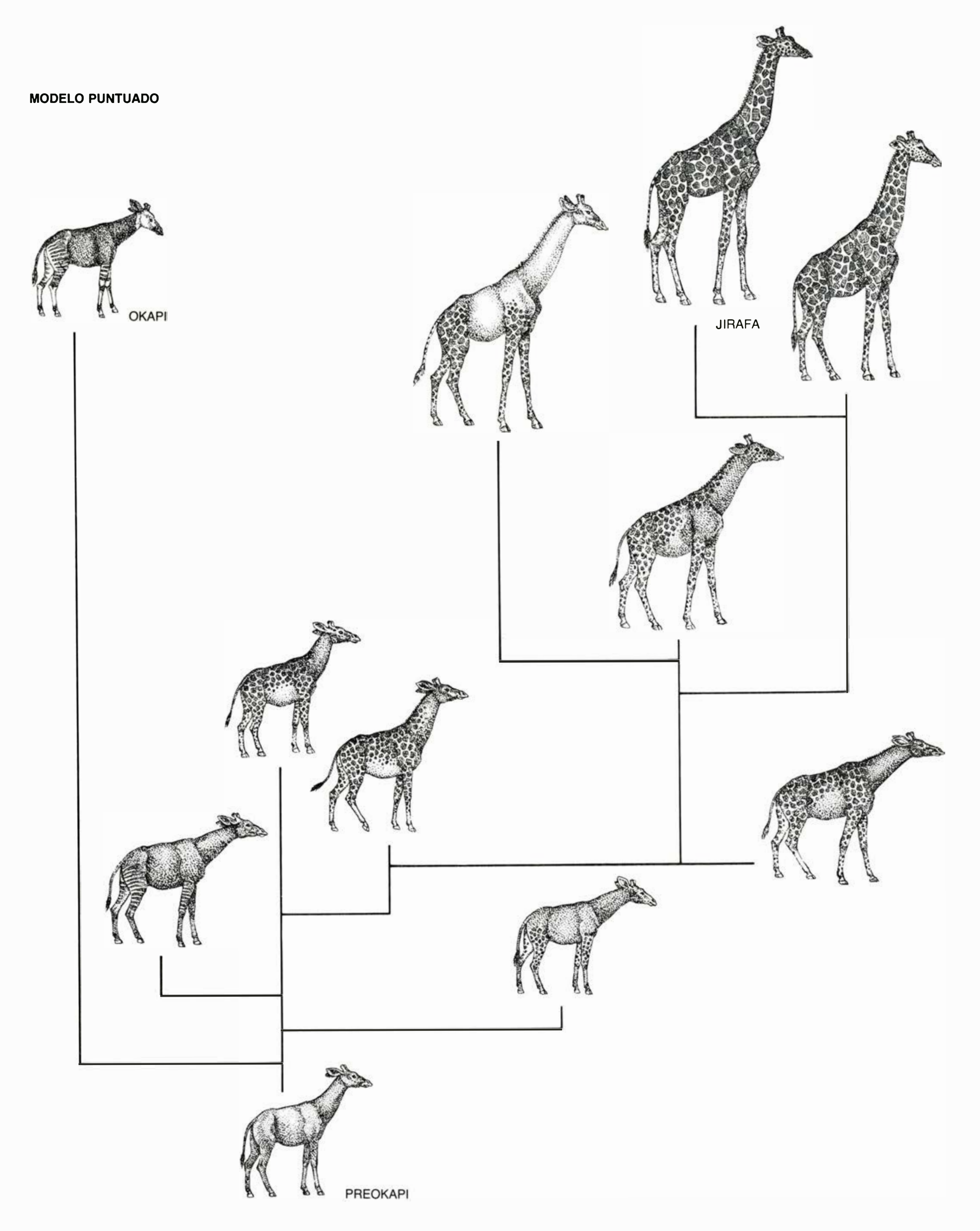
Equilibrio puntuado

Una cuestión diferente, también en relación con el ritmo evolutivo, constituye la clave del conflicto entre las teorías sintética y del equilibrio puntuado, propuesta esta última por Niles Eldredge, del Museo Americano de Historia Natural, y Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard. En este caso, la argumentación se refiere a la evolución morfológica, a través de la cual cambian los atributos observables, y no a la que se produce en el nivel molecular. En este debate, los oponentes ocupan el campo opuesto al adoptado por los neutralistas y, mientras que éstos mantienen que el ritmo de evolución molecular es más regular de lo que exige la teoría sintética, los puntualistas sostienen, basándose en pruebas fósiles, que el ritmo de evolución morfológica es menos regular de lo que esa hipótesis requiere.

Eldredge y Gould rechazan la explicación proporcionada por Simpson y otros referente a la rareza o ausencia en el registro fósil de especímenes morfológicamente intermedios entre formas sucesivas, esto es, niegan que el registro sea incompleto. En contraposición, aceptan el registro tal y como se presenta, y sostienen que la aparición súbita de nuevas especies fósiles refleja que su formación se sigue a través de explosiones evolutivas, después de las cuales la especie sufrirá pocos cambios durante millones de años. En su opinión, la noción de gradualismo debe remplazarse por una concepción evolutiva en la que las convulsiones alternen con períodos de estasis prolongada.

La disputa con los puntualistas pierde parte de su interés si se toma en consideración que, en parte, no pasa de ser un artificio, producto de la diferencia radical entre dos escalas de tiempo: la de los paleontólogos, proponentes de la teoría del equilibrio puntuado, y la de los genéticos, que formularon la teoría sintética. Puesto que entre el depósito de capas consecutivas en los estratos geológicos pueden transcurrir decenas de miles de años, los cambios morfológicos ocurridos a lo largo de miles de generaciones parecerán repentinos en el registro fósil. Por el contrario, los genéticos consideran graduales aquellos cambios que precisan 200 generaciones o más, ya que esos períodos exceden la duración de cualquier experimento, a no ser los que se lleven a cabo utilizando microorganismos. Cuando unos hablan de cambio rápido y otros de evolución gradual, puntualistas y gradualistas están, en muchas ocasiones, refiriéndose a lo mismo.

Por consiguiente, los episodios que en el registro fósil parecen mostrar un cambio violento no se oponen necesariamente a la teoría sintética ni a su preferencia por los procesos graduales. ¿Podría decirse lo mismo de los largos períodos de estasis a que se refieren los puntualistas, en los que las características observables de una especie cambian poco o nada? Muchos paleontólogos ajenos a la teoría del equilibrio puntuado concuerdan en que, si se considerase con mayor detalle el registro fósil, la es-

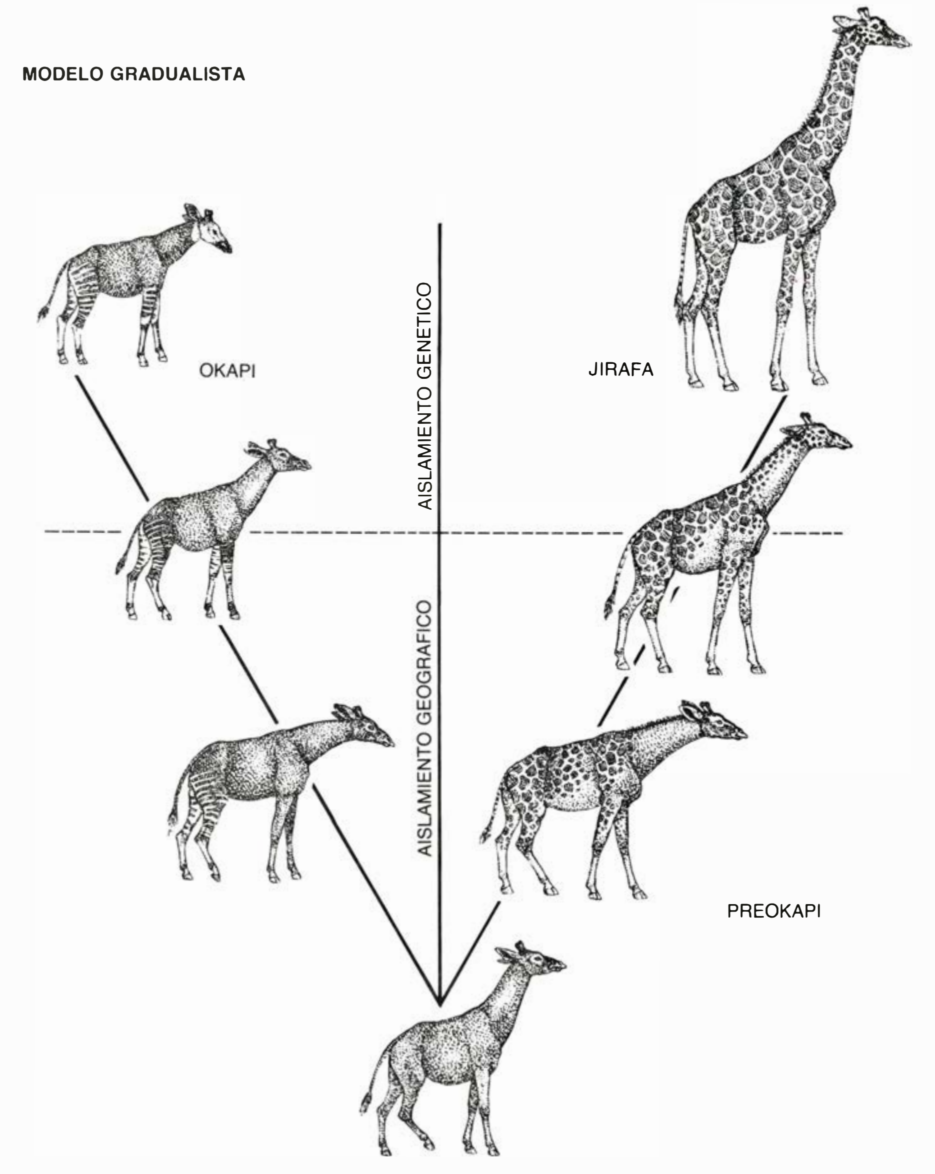


8. COMPARACION ENTRE MODELOS EVOLUTIVOS. Nos proporciona dos escenarios distintos para la representación de la divergencia entre el okapi y la jirafa a partir de un antepasado común. En el modelo del equilibrio puntuado *(izquierda)* el cambio morfológico ocurre de forma súbita y viene acompañado por la aparición de especies nuevas, aisladas a efectos reproductores. Así, la ruta evolutiva que va del preokapi ancestral a la actual jirafa se bifurca repetidas veces en poblaciones pequeñas y aisladas que evolucionan rápidamente a especies diferenciadas, constituyendo cada una de ellas una variante morfológica nueva. En este supuesto, el okapi se desarrolló a partir de la especie ancestral de una forma similar, aunque más directa. Un salto único ocurrido en una población aislada originó el desarrollo de la morfología propia del okapi y, a continuación, éste no experimentó más cambios. En el

tabilidad de los atributos observables a lo largo de millones de años sería mucho mayor de lo que pensaron los creadores de la teoría sintética a la hora de su formulación. No obstante, parte de esa aparente persistencia del registro puede ser reflejo del fenómeno llamado evolución en mosaico, descrito por primera vez por el evolucionista británico Sir Gavin de Beer.

El término hace referencia al hecho de que el ritmo de cambio de las diferentes partes de un organismo no es uniforme en el transcurso de la evolución. Al igual que los genes y proteínas no evolucionan al unísono, los caracteres observables regidos por ambos tampoco lo hacen con tasas idénticas. Un fósil que se encuentra en la mitad de una serie temporal que va de un organismo a otro no tiene por qué ser intermedio entre ambos en todas sus características; por el contrario, tal criatura sería comparable a un mosaico que se asemejara más al organismo ancestral en ciertos atributos y al descendiente en otros. La especie fósil *Archeopteryx,* intermedia entre los reptiles y las aves, posee un esqueleto considerado típico de reptil, mientras que su plumaje es semejante al de las aves, incluso en la diferenciación entre el plumón del cuerpo y las plumas remeras de las alas. Los australopitecinos, probables antepasados de los seres humanos que vivieron hace entre dos y cuatro millones de años, se asemejan a nosotros en la forma de los huesos de la cadera, que les permitía adoptar una postura erecta, mientras que su capacidad craneal se aproxima más a la de los simios.

Parte de la estasis que aparentemente se observa en el registro fósil puede derivarse de este modelo evolutivo. Cuando se sigue la evolución de un solo carácter en el registro fósil, se observan largos períodos en los que el cambio experimentado es escaso. Sin embargo, al mismo tiempo que es pequeño el cambio sufrido por un determinado carácter, otros, que no han dejado huella en el registro fósil, pudieran continuar evolucionando. El argumento puntualista es quizá más convincente cuando se aplica a un carácter concreto que al referirse al organismo como un todo.

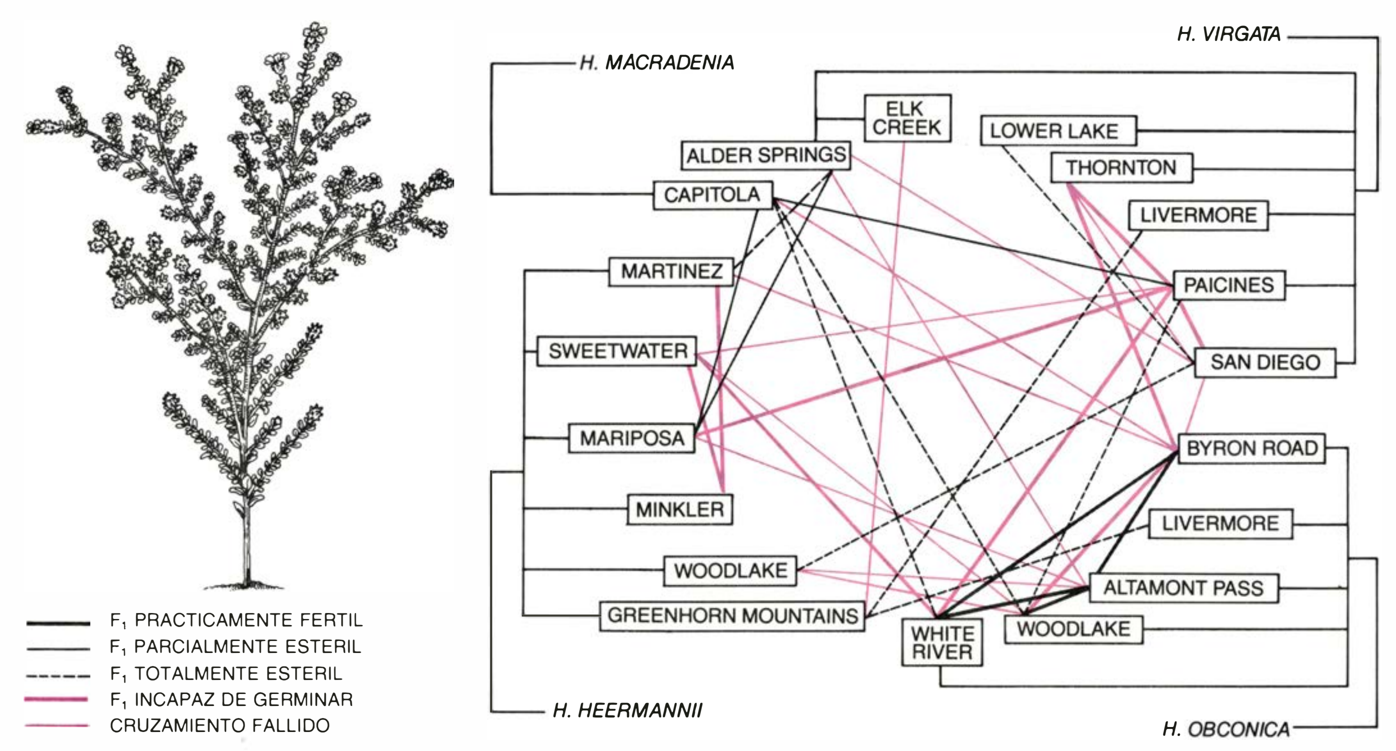


modelo gradualista *(derecha)* las especies están sometidas a un cambio morfológico lento y continuo. En este supuesto, la divergencia morfológica entre el okapi y la jirafa comenzó mucho antes de que se convirtieran en especies diferentes, y persistió después de que ello ocurriera. La diferenciación se inició al dividirse la especie preokapi en dos poblaciones por causa de una barrera geográfica y, casualmente, se acumularon diferencias genéticas suficientes para que esos dos grupos fueran incapaces de aparearse, adquiriendo así la categoría de especies distintas. De hecho, la evolución ha seguido ambos patrones.

Morfología y especiación

La teoría del equilibrio puntuado no sólo se refiere al ritmo de la evolución, sino también a su curso. Eldredge y Gould postulan que la anagénesis (los cambios morfológicos experimentados por un mismo linaje) y la cladogénesis (la división de una especie en dos) están relacionadas causalmente. Así, mantienen que se da una breve aceleración del cambio morfológico precisamente cuando una población de censo reducido diverge de su especie original para formar otra nueva, y que, a continuación, el cambio es muy lento hasta el momento en que la especie se extingue o da lugar a otras diferentes. La noción contraria, que los puntualistas atribuyen a la teoría sintética, consiste en que el cambio morfológico gradual que se registra en una especie lleva consigo su división en razas y subespecies mucho antes de que pueda afirmarse que han aparecido especies nuevas.

En realidad, el cambio evolutivo sigue esos dos patrones, y otros muchos. Numerosos estudios han puesto de manifiesto que el cambio morfológico y la aparición de mecanismos de aislamiento reproductor (situación que define las especies) son fenómenos genéticamente diferentes, que pueden darse al mismo tiempo o por separado. Arne Müntzing, de la Universidad de Lund, demostró hace ya muchos años que los genes que codifican diferencias morfológicas entre especies de plantas con flores no están ligados a los que condicionan la fertilidad de los híbridos, cuya función es mantener la especie reproductivamente aislada. Cruzando dos especies de *Galeopsis,* Müntzing obtuvo híbridos parcialmente fértiles a partir de los cuales consiguió una segunda generación. Parte de esos últimos resultaron morfológicamente in-



9. FRACASO DEL ENTRECRUZAMIENTO, a pesar de la existencia de estrechas semejanzas morfológicas, entre varias especies de *Holocarpha (izquierda)*. El polígono de cruzamientos *(derecha)* indica los resultados en 19 poblaciones procedentes de distintas localidades californianas pertenecientes a cuatro especies. En muchos casos no se produjeron híbridos; en otros, los de primera generación (F_1) resultaron estériles. En contraposición al modelo evolutivo del equilibrio puntuado, según el cual las diferencias morfológicas y la presentación de barreras reproductoras que definen la especie están estrechamente relacionadas y evolucionan juntas, *Holocarpha* ha evolucionado en varias especies sin que se observen entre ellas diferencias de mayor entidad.

termedios entre las especies parentales, señal de que habían heredado de ambas genes determinantes de su aspecto morfológico. Sin embargo, esos individuos intermedios no parecían haber heredado los genes responsables del aislamiento reproductor junto con los de la morfología, puesto que unos pocos híbridos de segunda generación fueron totalmente fértiles. Otros, que no eran morfológicamente intermedios sino que se asemejaban más a una de las dos especies parentales, eran estériles. Resultados semejantes a los de Müntzing han sido obtenidos con posterioridad en otras especies vegetales.

En animales, la diferenciación morfológica y el aislamiento reproductor privativo de la especie también se desarrollan independientemente. En el interior de los Estados Unidos existen muchas especies gemelas de *Drosophila,* morfológicamente idénticas por más que estén aisladas en términos reproductores. En el archipiélago hawaiano, donde han surgido varios cientos de especies de *Drosophila,* el patrón es muy diferente, encontrándose diferencias morfológicas notables entre especies poco diferenciadas, e incluso entre poblaciones de una misma especie de distinta procedencia geográfica cuyos individuos pueden cruzarse unos con otros. Esta disyunción entre evolución morfológica, por una parte, y diferenciación cromosómica u otras formas de aislamiento reproductor, por otra, aparece igualmente en muchos grupos de mamíferos.

Estos y otros muchos ejemplos indican que las condiciones conducentes a adaptaciones morfológicas innovadoras y las que promueven la especiación no se dan conjuntamente. El cambio morfológico tiene lugar como respuesta a desafíos ambientales, tales como la aparición de nuevos depredadores o la ocupación de un nuevo hábitat, mientras que la división de una población en nuevas especies deriva de la estructura poblacional, por ejemplo por una distribución discontinua en hábitats restringidos espacialmente.

Ambas circunstancias se dan a menudo al mismo tiempo, o en sucesión próxima y, por tanto, favorecen esa relación entre especiación y cambio morfológico que adquiere una importancia crucial en la teoría del equilibrio puntuado. Los caracoles fósiles de los estratos pleistocénicos (Edad Glacial) de las Bermudas, estudiados por Gould, pueden encajar en este modelo. En ellos parece definirse una filogenia ramificada en la que cada raza representa al mismo tiempo una nueva especie y una modificación detectable de la morfología de la concha, aunque esta última no sea de mayor consideración. Con todo, debemos tener en cuenta la posibilidad de estar razonando en círculo, puesto que se identifica una nueva especie cada vez que se observa un cambio morfológico a lo largo de una secuencia temporal de fósiles, por lo que la especiación y la evolución morfológica quedan estrechamente ligadas. De hecho, cabría que la especiación hubiera ocurrido, sin dejar rastros fósiles, en algún momento intermedio entre los períodos de cambio apreciados, y parte de las divergencias observadas pudieran ser características de poblaciones interfértiles que no poseen la categoría de especies diferentes.

Selección de especies

De acuerdo con su aseveración de que el cambio evolutivo de una especie no guarda mayor relación con las tendencias evolutivas generales, los puntualistas han adoptado el concepto denominado selección de especies. La selección de especies amplía el campo de la selección natural (que de ordinario se refiere a individuos o, más concretamente, a genes) a la especie considerada como un todo. Esta noción supone que una especie dotada de un cierto atributo tendrá mayor probabilidad de perdurar y dar origen a otras

nuevas que una que carezca de él. Por ejemplo, en un cierto grupo de organismos, pudiera ocurrir que aquellas especies cuyos individuos fueran de mayor tamaño dieran lugar a nuevas especies con mayor facilidad o se extinguieran con mayor dificultad que otras cuyos individuos fueran de menores dimensiones. En este caso, el tamaño promedio de los organismos del grupo de especies aludido aumentará evolutivamente con el paso del tiempo, y tal incremento no será el resultado de una evolución conducente a mayor tamaño en un linaje dado, sino que provendrá de la multiplicación en número de aquellas especies cuyos individuos sean de gran tamaño.

Existe, sin embargo, una diferencia esencial entre el sino relativo de las especies y la difusión de unos genes y de sus combinaciones en una determinada población. Puesto que los alelos de un mismo gen son portadores de información alternativa, y cada cromosoma sólo contiene uno de ellos, cualquier aumento del número de individuos portadores de un alelo de un gen concreto implica necesariamente la reducción de la frecuencia de los restantes alelos. Así, cabe decir que los alelos compiten entre sí por la supremacía en el acervo genético de una población, al conferir efectos adaptativos a sus portadores.

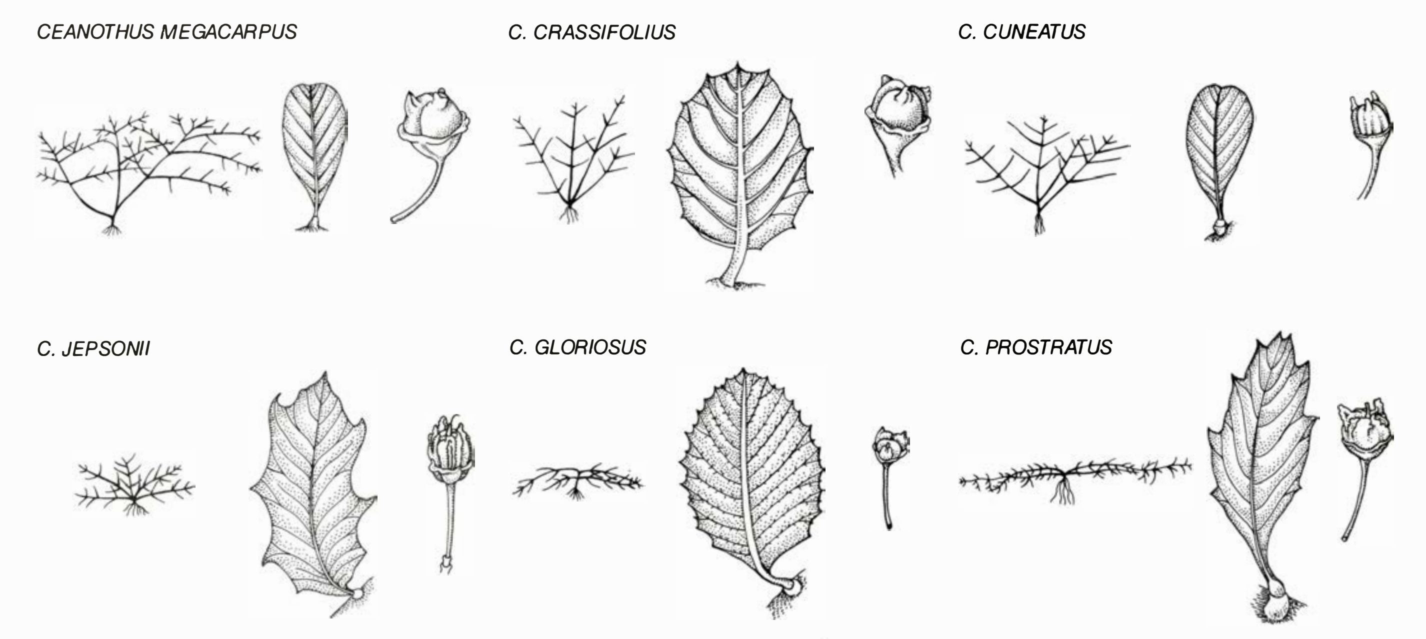
En las especies la situación es distinta, puesto que las que están emparentadas no suelen competir directamente. Por ejemplo, las especies gemelas de *Drosophila,* muy semejantes morfológicamente, coexisten unas junto a otras utilizando el ambiente de manera algo dispar. El origen y el grado de difusión de una especie no hace que otras del mismo linaje decaigan o se extingan. El que una especie desaparezca no suele deberse a la competencia con otras próximas, sino a que su acervo genético no es capaz de adaptarse al cambio ambiental. El desafío del medio puede, desde luego, llevar consigo la competencia con otras especies, pero frecuentemente estas otras no están emparentadas filogenéticamente con la que se extingue. El concepto de selección de especies es, pues, de dudoso valor, en la medida en que implica un paralelismo con la selección génica.

Es cierto, y así lo admitió Simpson hace unos 40 años, que las tendencias evolutivas morfológicas no son exclusivamente consecuencia de la evolución genética que tiene lugar en cada especie, sino también de las diferencias de supervivencias y ritmos de multiplicación de éstas; con todo, el primer proceso es el más importante. El sino de las especies depende de la capacidad de los individuos que las componen para enfrentarse al medio, y tal aptitud sólo puede provenir de la selección natural de genes.

Una nueva síntesis

¿Hasta qué punto ha capeado la teoría sintética de los años 40 el temporal provocado por los recientes avances de la investigación y la teoría? La moderna biología molecular, al demostrar que el proceso evolutivo en el nivel del ADN es mucho más complejo de lo que se suponía, ha demolido parte de lo que antes se tenía por cierto. Pero, al mismo tiempo, también ha proporcionado nuevas bases para dilucidar un interrogante fundamental que los padres de la teoría sintética no podían resolver, esto es, cómo se acumula la información genética a lo largo de la historia evolutiva. Neutralistas y seleccionistas, cuya afinidad podría a primera vista ponerse en duda, pueden ambos mantener sus postulados básicos en el marco armónico proporcionado por una teoría más amplia, que otorga al azar un papel de mayor importancia en el cambio genético. Algunos principios de la teoría del equilibrio puntuado pueden refutarse; otros resultan compatibles con una teoría sintética modificada, que abarque los conceptos de estasis de las especies y de la evolución en mosaico.

Cualquiera que sea el nuevo acuerdo que surja de la investigación y la controversia actuales, no es probable que exija el rechazo del programa básico del darwinismo y de la teoría elaborada a mediados de este siglo. La teoría sintética del siglo XXI se apartará considerablemente de la que se elaboró hace unos pocos decenios, pero su proceso de aparición tendrá más de evolución que de cataclismo.



10. DIFERENCIAS MORFOLOGICAS en porte, forma de la hoja y de la cápsula entre seis especies del género *Ceanothus*. Al igual que ocurría con el género *Holocarpha* , las barreras reproductoras y las diferencias morfológicas no tienen por qué evolucionar al unísono, de manera que estas seis especies, notoriamente diferentes, pueden cruzarse unas con otras; los híbridos resultantes son fértiles. Aunque la incapacidad para cruzarse es el criterio común para distinguir unas especies de otras, los casos que examinamos se consideran especies distintas basándose en las notables diferencias morfológicas que existen entre ellas, por su adaptación a distintos climas y suelos y porque, en condiciones naturales, no se registran esos cruzamientos interespecíficos.

Reconocimiento quimiosensorial de la individualidad genética

Ciertos genes que regulan funciones inmunológicas confieren a los ratones olores característicos. Así, husmeando, un ratón llega a discernir entre las diferencias genéticas de sus potenciales parejas

Gary K. Beauchamp, Kunio Yamazaki y Edward A. Boyse

Para los seres humanos, especie cuyos sentidos dominantes son la vista y el oído, el del olfato parece poco menos que un lujo. Resulta difícil imaginar cuánta importancia reviste para los miembros de otras especies que sus individuos puedan reconocerse a través del olor. Nuestros estudios con roedores demuestran que el olor que desprende un animal está determinado en parte por sus genes, principalmente por genes localizados en una región cromosómica de vital importancia en todos los mamíferos, por el papel que desempeña en el reconocimiento inmunológico y porque, además, decide la suerte de los órganos y tejidos trasplantados.

Iniciamos nuestra investigación en el centro de estudios del cáncer Memorial Sloan-Kettering, de Nueva York, a raíz de observaciones casuales sobre el comportamiento social de ratones realizadas durante unos trabajos con colonias de ratones consanguíneos. Concretamente, se advirtió que los ratones que diferían genéticamente sólo en una región cromosómica que contiene un grupo de genes implicados en funciones inmunológicas, conocidos con el nombre de Complejo Principal de Histocompatibilidad, o MHC (el MHC de ratones se denomina *H*-2 y, el humano, HLA), se reconocían unos a otros por el olor. Paralelamente, Lewis Thomas, que presidía el centro pero desconocía aún esas observaciones, propuso que los genes de histocompatibilidad conferían un olor característico a cada individuo. La afortunada coincidencia entre observaciones y teoría fue el punto de partida de una serie de estudios sobre el reconocimiento olfativo de la identidad genética, con su epicentro en el Centro de Estudios Quimiosensoriales Monell, de la Universidad de Pennsylvania.

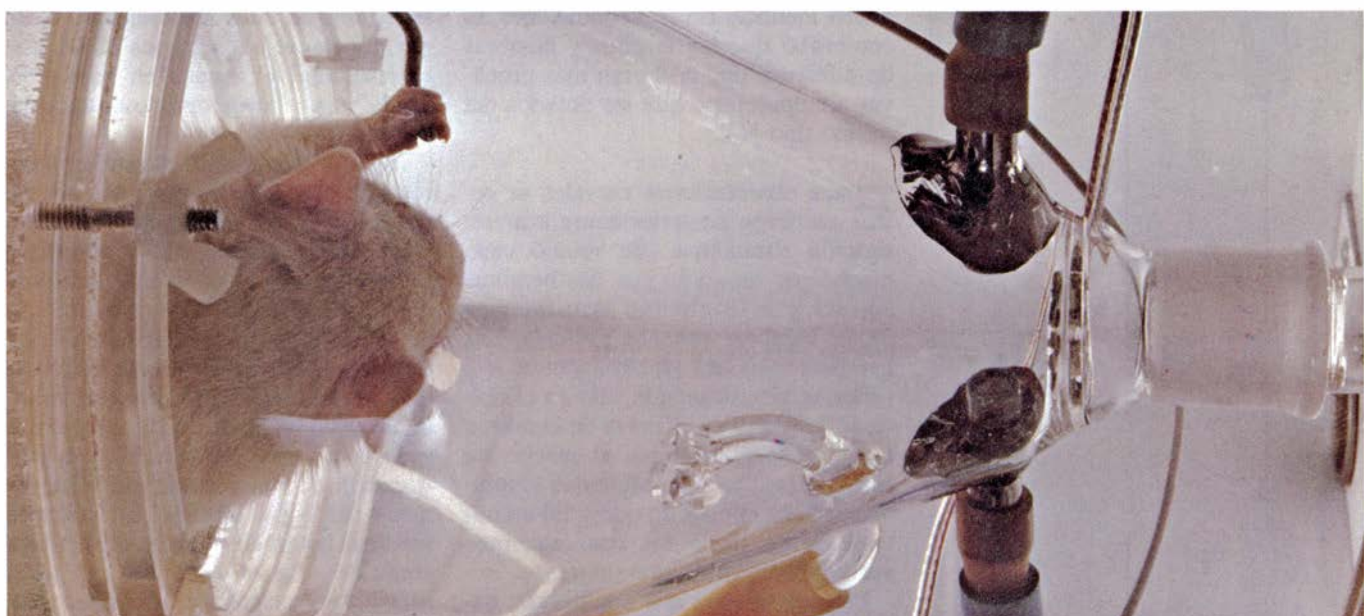
La importancia del grupo de genes MHC es grande, pues se supone que en todos los vertebrados actúa un juego similar de genes. En el hombre, ese complejo se conoce sobre todo por su influencia en los trasplantes de riñones y otros órganos y tejidos. Tanto el donante como el receptor del trasplante deben tener tipos HLA similares; de lo contrario, el trasplante se reconocerá como extraño y será atacado y rechazado por las células inmunológicas, o linfocitos, del receptor. (Las células inmunes responden a una amplia variedad de estímulos químicos procedentes del ambiente, confiriendo protección contra todo tipo de infecciones. El olfato reconoce también gran cantidad de señales químicas, por mediación de las células del sistema nervioso.)

Algunos de los genes que forman el MHC, principalmente los llamados *H-2K* y *H-2D,* son extraordinariamente mutables. Constituyen lo que se denomina un "punto caliente genético", es decir, un lugar del genoma donde las mutaciones se dan con una frecuencia considerablemente alta. Lo cual se traduce en la existencia de un gran número de alelos, o formas alternativas de tales genes. Por consiguiente, resulta extremadamente improbable que dos animales no emparentados posean el mismo tipo MHC. Esa es la razón principal de que resulte tan difícil encontrar en el hombre donantes y receptores de órganos con MHC que "case", salvo entre miembros de una misma familia. En células de individuos distintos, los productos sintetizados a partir de las instrucciones determinadas por los genes MHC suelen ser, pues, muy diversos. Tales productos son proteínas, que tras la adición de ciertos carbohidratos se convierten en glicoproteínas, localizadas fundamentalmente en la membrana externa que forma la superficie de una célula. Así, la variabilidad existente entre los genes MHC determina en gran medida la individualidad bioquímica de la superficie celular, y lo que P.B. Medawar denominó "la singularidad del individuo".

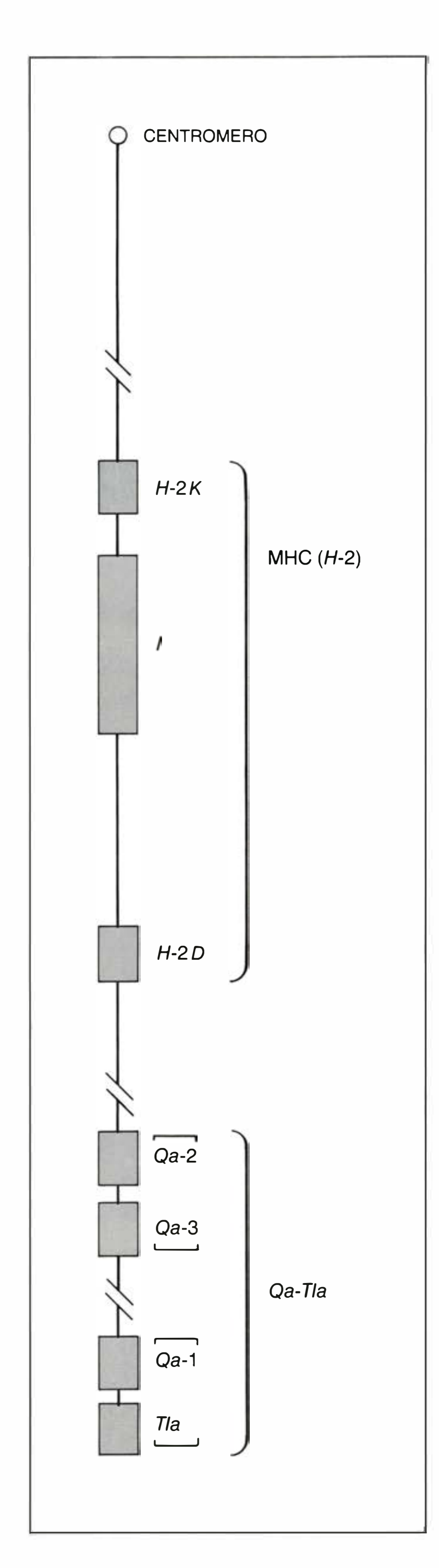
Como en otros campos de las investigaciones biomédicas, las estirpes consanguíneas de ratones han resultado de valor inestimable en los trabajos que se describen en este artículo. Se obtienen estirpes consanguíneas realizando cruzamientos seriados entre hermanos durante muchas generaciones, hasta lograr una uniformidad genética [*véase la figura 3*]. Las estirpes consanguíneas congénicas constituyen un refinamiento aún mayor. Se obtienen cruzando primero estirpes consanguíneas. Posteriormente, durante muchas generaciones, se cruza la descendencia de cada generación con ratones de la primera estirpe consanguínea parental. En cada uno de esos "retrocruzamientos" se selecciona la descendencia que presenta cierto carácter genético, como por

1. ENTRENAMIENTO DE UNA RATA para que distinga el olor de dos estirpes de ratones congénicos, o estrechamente emparentados. La fotografía se tomó en el Centro de Estudios Quimiosensoriales Monell, de Philadelphia. El ensayo comienza cuando la rata se coloca por sí sola en posición de recibir cierta cantidad de aire, perfumado con la orina de un ratón elegido entre dos estirpes *(arriba).* Si el olor es de los que merecen recompensa para la rata, ésta debe (en cuatro segundos) presionar una llave cercana a su cabeza *(centro).* La recompensa es una gota de agua *(abajo).* Los resultados demuestran que el sentido del olfato permite a los roedores de un género (la rata) reconocer en otro género (el ratón) diferencias genéticas del Complejo Principal de Histocompatibilidad (MHC), grupo de genes con funciones vitales en el reconocimiento y respuesta inmunológicos, incluidas la aceptación o rechazo de transplantes de órganos o tejidos. El aparato lo construyeron entre Heather Duncan, Burton Slotnick y Charles J. Wysocki.









2. REGION *H*-2, situada en el cromosoma 17 del ratón, en la que se localizan los genes MHC. Entre éstos se cuentan el gen *H-2K*, el *H-2D* y los genes *I*, todos los cuales determinan la composición de las glicoproteínas de la superficie celular. Además, contribuyen a los procesos de reconocimiento y respuesta inmunológicos. Los genes vecinos *Qa* y *T 1 a* son muy parecidos a los *H*-2, tanto en su secuencia de ADN como en la estructura de las glicoproteínas de superficie celular que determinan; no obstante, se desconocen sus funciones. Los paréntesis indican dudas acerca del orden de los genes.

ejemplo el MHC (*H*2) [*véase la figura 4*]. Se obtienen así dos estirpes de ratones que difieren solamente en un segmento de su material genético. En el caso del MHC, por ejemplo, las estirpes congénicas serán genéticamente idénticas salvo en la región del cromosoma 17 (el ratón posee 20 pares de cromosomas), que lleva el grupo de genes MHC (*H*-2).

Las primeras observaciones sobre pautas de comportamiento basadas en el reconocimiento sensorial de los tipos MHC datan de 1974, y se realizaron en las salas de cría del centro Sloan-Kettering. Se habían puesto en contacto machos de líneas consanguíneas con parejas de hembras congénicas *H*-2, de forma que cada macho se hallaba en la misma jaula que una hembra genéticamente idéntica a él y otra de diferente tipo *H*-2, pero por lo demás genéticamente idéntica. En esas condiciones, se comprobó que los machos y hembras de diferente tipo *H*-2 eran más proclives a emparejarse que los dotados del mismo tipo *H*-2.

Estas observaciones casuales se sometieron posteriormente a investigación sistemática. Se reunió cada macho por separado con dos hembras en celo, y se les observó hasta que una de las hembras quedaba preñada. Las hembras utilizadas eran congénicas *H*-2 (diferían genéticamente sólo en el tipo de *H*-2), y una de ellas era de la misma línea consanguínea que el macho de turno. Tras realizar diferentes combinaciones de tipos *H*-2 se advirtió un notable sesgo hacia los apareamientos entre individuos de tipo diferente.

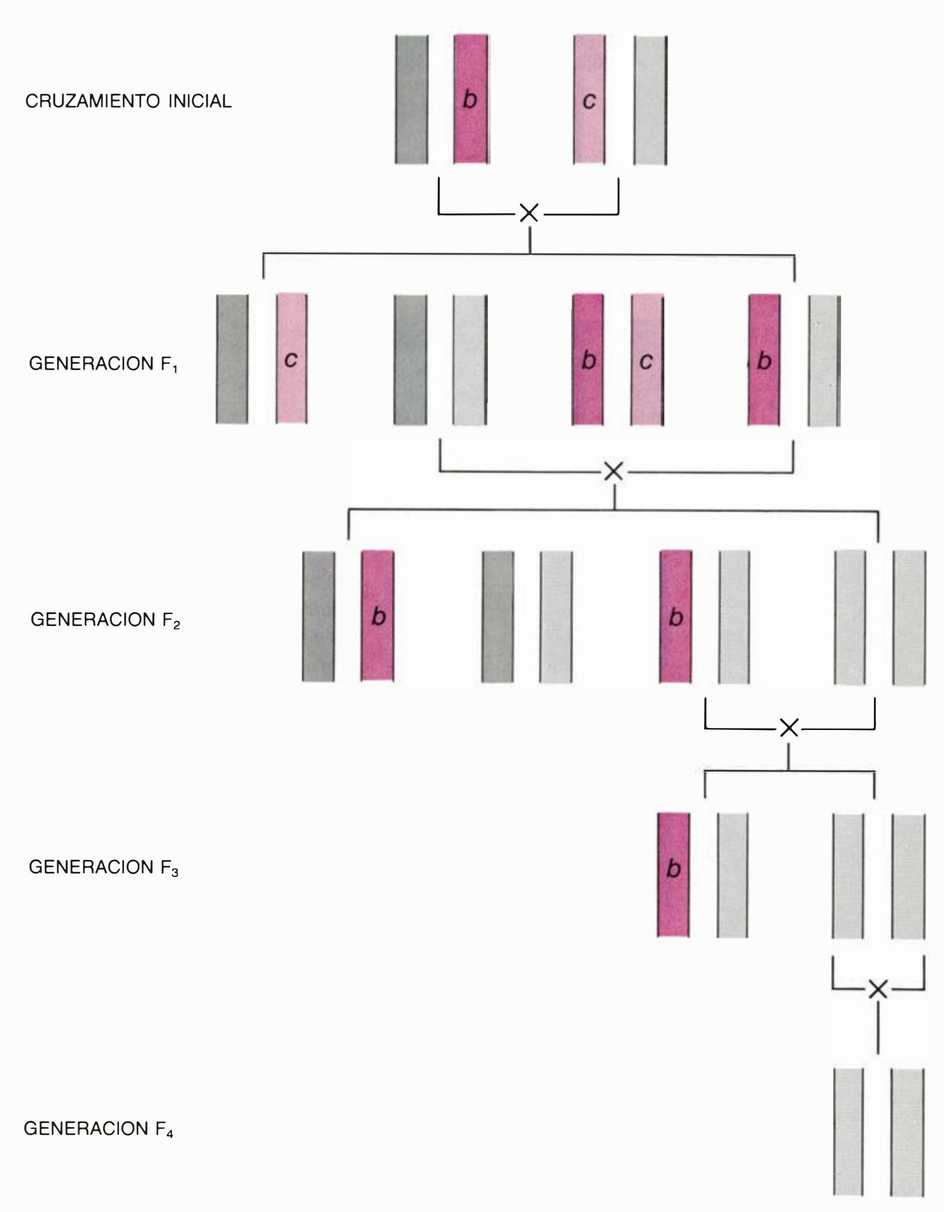
Para corroborar que a la discriminación sensorial subyacía una base genética realizamos una prueba convencional, basada en la obtención de la generación F_2 [*véase la figura 5*]; al efecto se cruzan dos ratones congénicos *H*-2 (genéticamente idénticos salvo en *H*-2); la descendencia de este cruzamiento es la generación F_1 (primera generación filial) genéticamente uniforme: todos los ratones son heterocigotos para *H*-2, esto es, todos portan los alelos *H*-2 del padre y de la madre. Seguidamente se cruzan entre sí los ratones de la F_1; la descendencia resultante constituye la generación F_2, que consta de dos grupos de homocigotos para *H*-2, cada uno de ellos genéticamente idéntico a uno de sus abuelos, y un grupo de heterocigotos, genéticamente idénticos a los ratones de la F_1. Cabe identificar los tres grupos haciendo reaccionar sus células con antisuero contra las glicoproteínas de superficie específicas de cada alelo *H*-2. (De forma similar, pero considerando los tipos HLA, se emparejan donantes y receptores de órganos humanos.)

Aunque los homocigotos de la F_2 de este cruzamiento eran genéticamente idénticos a sus abuelos, en lo que concierne a los genes *H*-2 habían estado expuestos a un ambiente diferente. Los abuelos, antes o después del nacimiento, no conocieron un medio *H*-2 que no fuera el suyo propio. Por el contrario, los homocigotos de la F_2 nacieron de padres heterocigotos de la F_1, por lo que estuvieron expuestos, antes y después del nacimiento, a un tipo de *H*-2 diferente del suyo. Observamos que las preferencias de apareamiento de los homocigotos de la F_2 no se correspondían en todos los casos con las preferencias de los ratones genéticamente idénticos a sus abuelos. Nuestra conclusión fue que tales preferencias, en lo que concierne a los grupos MHC, son el resultado, al menos en parte, del "sello" *(imprinting)* quimiosensorial familiar.

En 1978 finalizamos nuestros primeros trabajos. Confirmamos que los ratones lograban distinguir diferentes tipos de *H*-2, y que a ello se debían las preferencias de apareamiento entre individuos que diferían en esos tipos. Si tal preferencia opera también en la naturaleza, debería favorecerse los cruzamientos no consanguíneos y, por tanto, la heterocigosis para *H*-2, y promoverse la diversidad de genes *H*-2 y la propagación de sus mutaciones. El fenómeno del "vigor híbrido" (mayor aptitud de la heterocigosis genética) es bien conocido. En el caso de los genes MHC, heterocigosis y diversidad pueden conferir ventaja en la capacidad de respuesta frente a una amplia gama de antígenos (material extraño de cualquier tipo, capaz de provocar una respuesta inmunológica); también favorecen la adaptación del sistema inmunológico a nuevas amenazas, como puedan ser organismos infecciosos capaces de adecuarse a la respuesta inmunológica de sus hospedadores. La endogamia (consanguinidad), que tiende a restringir la diversidad del acervo genético, puede constituir un riesgo para los ratones, pues en la naturaleza, a partir de uno o pocos cruzamientos estacionales, aparecen poblaciones considerablemente grandes. De ahí la importancia de las preferencias de apareamiento basadas en una discriminación de los tipos *H*-2.

La observación de las preferencias de apareamiento resultaba un procedimiento demasiado engorroso para in-

dagar la naturaleza y los mecanismos genéticos de la individualidad del olor. De ahí que nos decidiéramos a construir un laberinto en forma de Y [*véase la figura 7*]. A partir de cámaras con determinados perfumes se forzaban corrientes de aire que arrastraban los olores por los dos brazos de la Y. Se entrenó a los ratones para que distinguieran entre un par de olores. Al ratón que iba a someterse a la prueba se le privaba antes de agua durante cierto tiempo. Cada vez que el animal, sediento, entraba en uno de los brazos perfumado con cierto olor, se le premiaba con un poco de agua. Primero se le enseñaba a distinguir entre dos olores fuertes, los del enebro y la canela. Si el ratón entraba,por ejemplo, en el brazo perfumado de enebro, recibía la recompensa. La siguiente prueba consistía en distinguir los olores de dos estirpes consanguíneas de ratones no emparentadas (diferían en gran parte de su genoma) situadas en las cámaras que desprendían el olor. Por fin, la última prueba fue que distinguieran los olores de estirpes congénicas *H*-2, que diferían sólo en el grupo de genes *H*-2. Se daba por terminada cada una de las fases del entrenamiento al alcanzarse un porcentaje de aciertos del 80 por ciento o superior. (Las elecciones aleatorias deben dar un porcentaje de aciertos del 50 por ciento.)

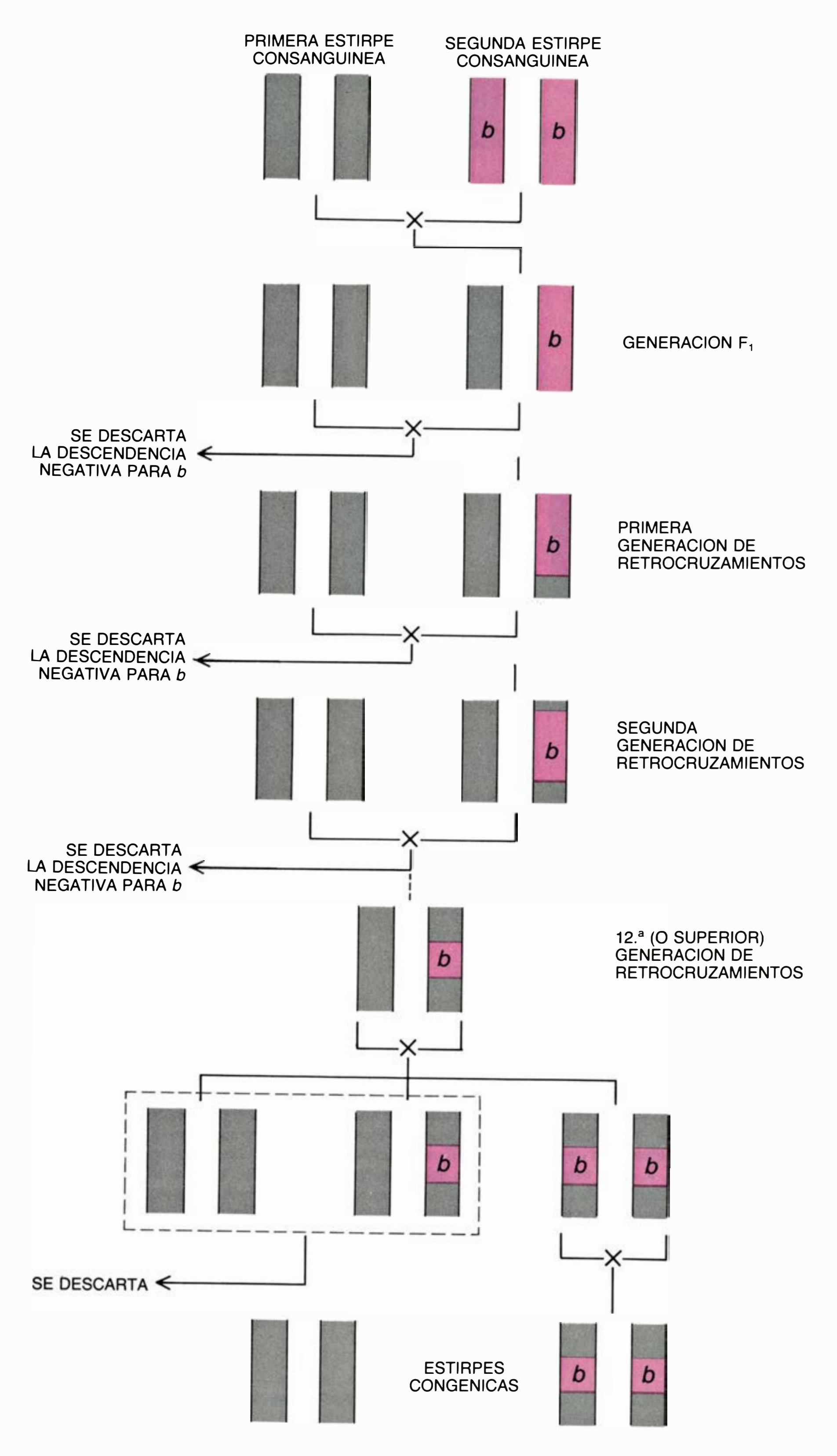


3. ESTIRPES CONSANGUINEAS de ratón. Las constituyen animales genéticamente uniformes y homocigotos: todos los ratones poseen en sus cromosomas los mismos alelos, o versiones de genes. Se obtienen tales estirpes al cabo de 20 a 30 generaciones de cruzamientos entre hermanos, cruzándose, en cada generación, la descendencia de una sola pareja. El primer cruzamiento se realiza entre dos ratones cualesquiera. Las letras *a, b, c* y *d* representan alelos del complejo de genes MHC (*H*-2) o de cualquier otra región cromosómica. El resto de los cromosomas no se muestran. (El ratón tiene 20 pares). La generación F_1 (primera generación filial) está formada por cuatro grupos de descendientes, *ac, ad, bc* y *bd* (todos heterocigotos). Elegimos para el siguiente cruzamiento una pareja al azar, en este caso la *ad* × *bd*, por lo que el alelo *c* se perderá en la F_2. Para el siguiente cruzamiento elegimos de nuevo una pareja al azar, ahora la *bd* × *dd*, con lo que *a* se pierde en la generación F_3. Por azar, el cruzamiento que va a dar lugar a la generación F_4 es *dd* × *dd*. Salvo mutantes, los ratones serán todos homocigotos *dd*. La teoría de probabilidades predice que en 20 o 30 generaciones se consigue la uniformidad genética y homocigosis.

En los primeros estudios realizados en el laberinto en Y se constató que resultaba fácil entrenar a machos o hembras para que distinguieran ratones congénicos *H*-2, sin que importara el sexo de esos últimos. Tanto daba que alguno o ninguno de los tipos *H*-2 utilizados como fuentes de olor fuesen idénticos al del ratón sometido a la prueba. Se comprobó posteriormente que la orina de los ratones congénicos *H*-2 podía sustituir a los propios ratones en las cámaras emisoras de olor. A partir de entonces se utilizó la orina como material experimental. El olfato, por tanto, bastaba para discriminar diferentes tipos de *H*-2. No se excluyeron otros canales sensoriales. Por ejemplo, bien pudiera ser que los ultrasonidos (mediante los cuales los ratones se comunican entre sí) acusaran las diferencias genéticas de los genes *H*-2.

En este tipo de estudios se tuvieron en cuenta variaciones individuales en el olor corporal y de la orina producidas por factores circunstanciales, así como el estado de salud, dieta, edad, cansancio y celo. Para "homogenizar" esos factores no genéticos preparamos grupos de ratones que habrían de servir de donantes de orina. Los ratones de esos grupos coincidían en edad y sexo, y se mantenían en ambientes uniformes. Sus orinas se utilizaban por turno, y nunca dos veces la misma combinación de donantes en una sola prueba. La alternancia de muestras de orina en las cámaras emisoras de olor se ajustaba a una serie de números aleatorios. Bajo esas condiciones, los ratones aprendían rápidamente a distinguir entre parejas de grupos de ratones congénicos *H*-2, pero no acertaban a distinguir entre parejas de ratones genéticamente idénticos.

Para confirmar la base genética de la discriminación sensorial de los tipos *H*-2, en el laberinto en Y, recurrimos de nuevo a una prueba con la F_2. El ensayo consistió en una "transferencia de entrenamiento", protocolo en el cual el ratón sólo puede valerse de lo que acaba de aprender a la hora de enfrentarse a un nuevo estímulo, en este caso muestras de orina de los ratones homocigotos de la F_2. En este tipo de prue-



4. ESTIRPES CONGENICAS de ratón. Son homocigóticas y genéticamente uniformes, salvo en una pequeña región de su material genético. Para conseguirlas, se cruzan en primer lugar dos estirpes consanguíneas. En este diagrama las estirpes pertenecen a diferentes tipos *H*-2 (*a*, *b*). Los ratones de la generación F_1 se retrocruzan con la primera de las estirpes consanguíneas. Se analiza la descendencia (primera generación del retrocruzamiento) para comprobar su tipo *H*-2, para lo cual se enfrentan sus células con anticuerpos contra *H*-2 (*b*). Los ratones positivos para *b* se retrocruzan de nuevo con la primera de las estirpes consanguíneas. El procedimiento se repite durante al menos 12 generaciones de retrocruzamientos. Al cabo, el tamaño del segmento cromosómico que portan los genes *H*-2 de la segunda de las estirpes consanguíneas se ha reducido notablemente, por efecto de los entrecruzamientos (intercambios de material genético entre parejas de cromosomas homólogos). A continuación, los heterocigotos *ab* de la duodécima (o posterior) generación de retrocruzamientos se cruzan entre ellos. Se analiza entonces la descendencia y se cruzan los homocigotos *bb* entre ellos, obteniéndose así la deseada estirpe congénica, que es idéntica a la primera de las estirpes consanguíneas salvo en que, en vez de los alelos *H*-2*a*, lleva los *H*-2*b*.

bas, un ratón entrenado para discernir entre olores de ratones congénicos *H*-2 se sometía a una serie de ensayos en los que no se le recompensaba en una cierta proporción de ellos, aunque la opción elegida fuese la correcta. Se sustituían entonces, en la misma proporción que la de ensayos no recompensados, una serie de muestras codificadas de orina pertenecientes a los correspondientes individuos homocigotos de la F_2 (muestras de orina que el ratón nunca antes había olido). Quien controlaba el ensayo desconocía la opción que debía tomar el ratón para cumplir con las predicciones del experimento. Puesto que los ensayos cruciales se realizaban sin recompensa, y sin ésta no hay nuevo aprendizaje, y, además, los que realizaban los experimentos desconocían cuál era cada muestra hasta el final de la prueba, una satisfactoria transferencia del aprendizaje previo eliminaba cualquier posibilidad de respuesta instada por un estímulo no intencionado, o por cualquier otra cosa que no tuviese su origen en una diferencia genética en el MHC. En todas las pruebas realizadas se transfirió correctamente el aprendizaje previo, confirmándose así el origen genético, con base en el grupo MHC, del estímulo sensorial en cuestión.

Además de las estirpes congénicas que difieren en el complejo *H*-2 entero, las hay que sólo difieren en parte del complejo. La existencia de ratones capaces de distinguir entre tales estirpes revela tres subregiones en este complejo, cada una de las cuales es responsable de un olor característico. Por tanto, cada "fragancia" *H*-2 refleja la actuación de diversos genes, y probablemente conste de varios componentes olorosos distintos.

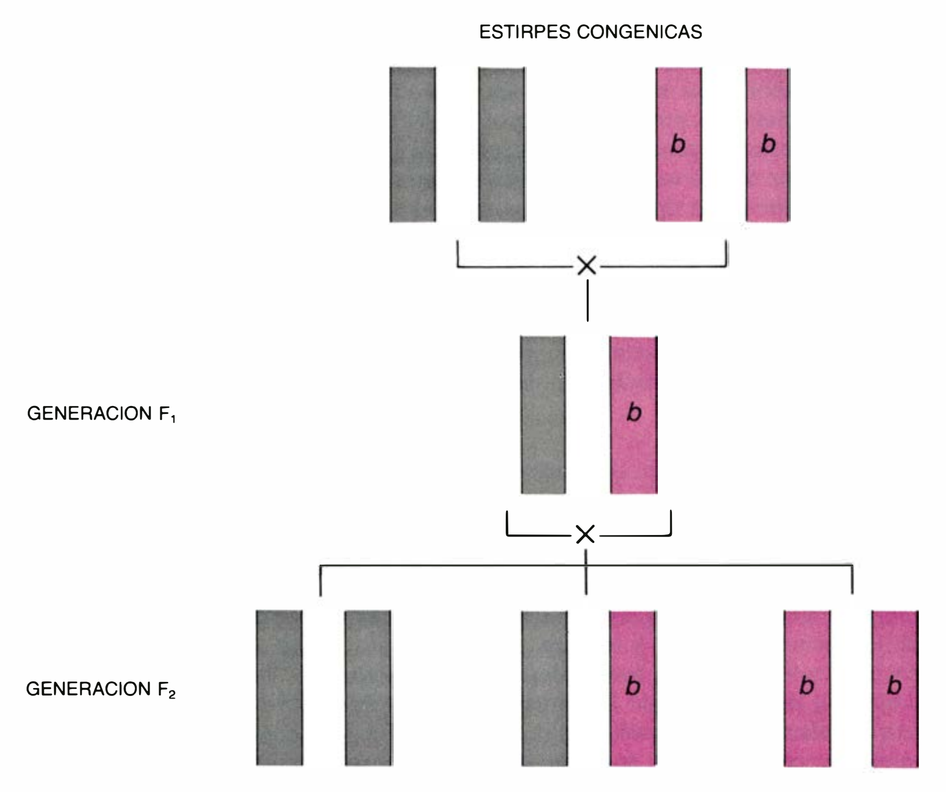
Nos preguntamos si los olores los determinaban algunos de los genes conocidos del complejo MHC o se debían a otros genes del complejo, no caracterizados aún. Dilemas así son frecuentes en biología. Se trata de averiguar si cierto carácter que se hereda ligado a un gen conocido está determinado por dicho gen o por otro, desconocido, muy próximo. La forma clásica de abordar el problema es ver si el carácter en cuestión se altera cuando se muta el gen conocido y presunto responsable del carácter. Examinamos al efecto una mutación del gen *H*-2*K*, que altera la secuencia de aminoácidos de la proteína *H*-2*K*. Comprobamos que, en los experimentos del laberinto en Y, los ratones distinguían las estirpes mutantes de las no mutantes. Parecía obvio,

pues, que para estudiar la individualidad del olor debíamos concentrarnos en los genes ya conocidos del Complejo Principal de Histocompatibilidad.

Se ha obtenido, por tanto, una explicación plausible de cómo está implicado el MHC en la determinación del olor característico de cada animal. El MHC presenta un alto grado de diversidad genética; los genes que lo forman participan directamente en los procesos de reconocimiento y respuesta inmunológica, bien frente a una infección, bien frente a cuerpos extraños, como los trasplantes. Además, se sabe que la diversidad genética del MHC se correlaciona con la variabilidad existente en muchos parámetros anatómicos, fisiológicos y del desarrollo, del tipo de los que constituyen el rango normal de variaciones estructurales y bioquímicas entre los miembros de cualquier especie. Ello sugiere que los genes MHC desempeñan funciones primordiales en el desarrollo de un animal a partir del óvulo fecundado, funciones que pueden depender de señales químicas y que, desde un punto de vista evolutivo, son bastante anteriores a las más evolucionadas y complejas del sistema de defensa inmunológico.

El parecido entre gemelos idénticos no nos resulta sorprendente. Son genéticamente exactos, lo que implica ausencia del elemento de variación genética que condiciona el aspecto del individuo. Por la misma razón, parece lógico que los animales consanguíneos, genéticamente idénticos, huelan igual, ya que faltará el elemento de variación genética que hipotéticamente afecta al olor de los subproductos evacuados a través de la orina y de otras secreciones. Recuérdese que se obtienen perfumes fácilmente distinguibles sin más que variar las proporciones de los constituyentes químicos de una mezcla de compuestos olorosos. Las variaciones genéticas del complejo MHC, al determinar cambios en la producción de metabolitos olorosos, pueden explicar por sí solas los olores asociados a tipos MHC específicos.

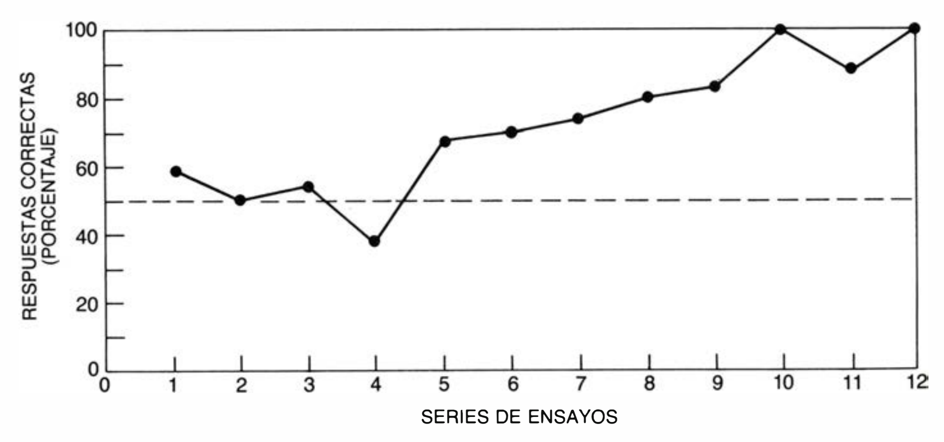
Una serie de experimentos posteriores permitieron profundizar en las sutilezas del mundo olfativo de los ratones. Durante las primeras etapas de la preñez de los ratones, hasta cuatro días después de la concepción, el embrión no está todavía unido a la pared del útero. La pared uterina se prepara para la implantación del embrión alterando el equilibrio hormonal. Si en ese período se separa de su pareja a una hembra preñada y se expone a la presencia, o el



5. RATONES F_2 CONGENICOS, genéticamente idénticos salvo en sus genes *H*-2. Se obtienen cruzando una pareja de estirpes congénicas para *H*-2. La generación F_1 está formada por heterocigotos idénticos (*ab*). De ellos se obtiene una F_2 de homocigotos y heterocigotos. Los homocigotos de la F_2 (*aa* y *bb*) son idénticos a sus abuelos, aunque su experiencia familiar es diferente, ya que son hijos de padres heterocigotos, mientras que sus abuelos (consanguíneos) tuvieron padres homocigotos. Los ratones congénicos F_2 resultan útiles a la hora de estudiar la heredabilidad de un carácter. Los dibujos son de Ilil Arbel.

olor, de un macho extraño, genéticamente diferente de su pareja, se transforma el equilibrio hormonal de la hembra, incrementándose el riesgo de aborto por fallo de la implantación del embrión.

Convencidos de que la diferencia en el tipo de *H*-2 permite a las hembras preñadas distinguir el olor de un macho extraño del propio de su pareja, comparamos la incidencia de abortos en hembras preñadas aisladas y sometidas al olor de machos genéticamente idénticos a su pareja, con la incidencia de abortos en hembras similares sometidas al olor de machos congénicos cuyo *H*-2 difería del que portaba su pareja. La incidencia de abortos resultó considerablemente mayor cuando el nuevo macho, o el olor de su orina, pertenecía



6. REGISTRO DEL ENTRENAMIENTO de un ratón. Permite guardar constancia del progreso de un animal durante su aprendizaje a discriminar los olores de la orina de ratones congénicos, genéticamente idénticos salvo en la región *H*-2. Al ratón que va a someterse al ensayo se le priva de agua durante cierto tiempo; se le coloca luego en un laberinto en forma de Y. Se perfuman los brazos del laberinto con muestras de orina procedentes de ratones congénicos de diferentes tipos *H*-2. Se recompensa al roedor con una gota de agua si entra en el brazo impregnado con el olor de la orina de una estirpe congénica concreta. Los ensayos se realizaron en series de 24, a razón de dos por día. En las cuatro primeras series las elecciones del ratón fueron casi aleatorias. Tras doce series, prácticamente no se registraron fallos.

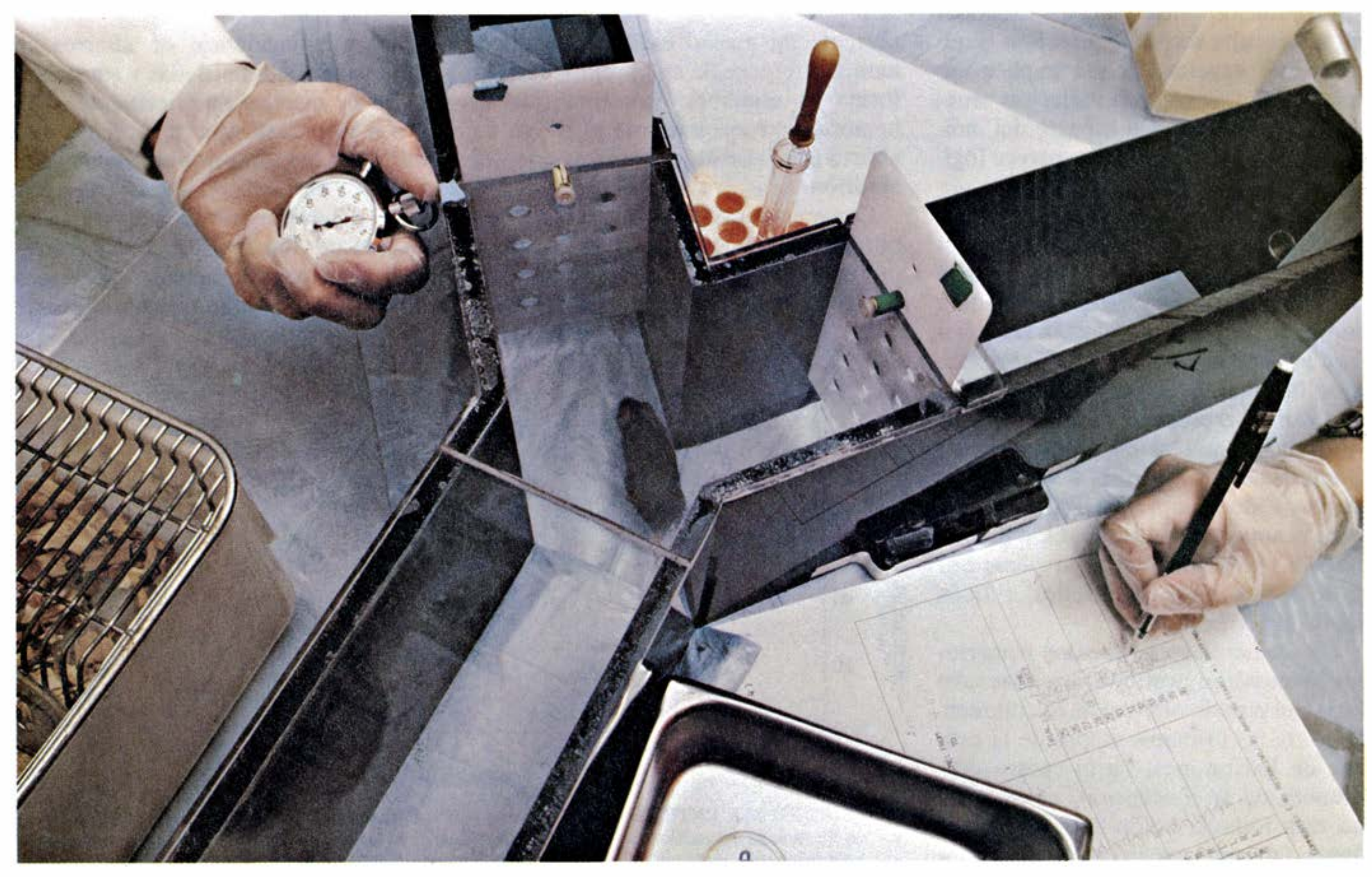
a la estirpe congénica. Un incremento menor, aunque significativo, en la incidencia de abortos se obtenía también cuando las hembras preñadas se exponían a hembras congénicas con un tipo *H*-2 diferente del de su pareja. Obviamente, el olor de un tipo *H*-2 no familiar (aunque no fuera acompañado del estímulo de la feromona, presente sólo en la orina del macho) podía desencadenar los procesos neuroendocrinos que determinan un desequilibrio hormonal, fatal para la continuación de la preñez.

Queda claro, por tanto, que entre los ratones se transmite información sensorial de naturaleza química, indicativa de una cierta constitución genética. Con todo, sólo hemos abordado un juego de genes, el Complejo Principal de Histocompatibilidad, y sólo una especie, el ratón. Además, hemos descuidado una de las caras de la moneda. Los dos elementos implicados en un sistema de comunicación son, de una parte, la producción y transmisión de la señal y, de otra, su recepción y la correspondiente respuesta. Obviamente, las variaciones genéticas que actúan sobre los sitios de recepción del olor, y por tanto en los sistemas nervioso y endocrino del animal, pueden constituir otra fuente de discriminación sensorial, además de la variabilidad genética de la emisión de la señal, que ha constituido hasta ahora nuestro objeto de estudio. Cabe preguntarse, por tanto, si dos ratones genéticamente distintos perciben de forma diferente el olor de un determinado ratón, que es lo contrario de lo que hasta el momento nos habíamos planteado, es decir, que un ratón discriminara entre dos ratones genéticamente distintos.

La existencia, en el hombre, de ciertas hiposmias específicas (variaciones de la sensibilidad al olor) permite suponer una determinación genética en la recepción y respuesta al olor. Ciertas personas son incapaces de percibir algunos olores, o sólo lo hacen a concentraciones notablemente mayores que las habituales. Para esas personas, la detección del olor resulta, a veces, cualitativamente distinta. Faltan, no obstante, estudios sistemáticos sobre la variabilidad genética de la capacidad receptora, comparables con los que ponen de manifiesto la variabilidad de señales (olores) en el contexto del reconocimiento sensorial de los tipos *H*-2.

Queda también por resolver si los trabajos que hemos descrito son extrapolables a otros genes de ratones y a otras especies. Consideremos primero los otros genes. La selección de pareja en razón del olor determinado por el tipo *H*-2 afectaría directamente a la composición genética de las poblaciones de ratones sólo en lo que atañe al cromosoma 17, donde se sitúan los genes del MHC (*H*-2). Si en cualquier otra parte del genoma del ratón hay genes que contribuyen al reconocimiento de los individuos por el olor, la selección reproductiva operará también en esos cromosomas. Hemos comprobado que en la prueba del laberinto en Y se distinguen estirpes de ratones no emparentados, si bien comparten el mismo tipo *H*-2, señal de que en la especificación del olor participa el genoma entero.

Con todo, es improbable que otra región cromosómica compita con *H*-2 en su capacidad para marcar a los ratones por el olor. Por una razón: no se conoce ninguna otra región cromosómica que presente tal diversidad entre ratones. Además, hemos realizado estudios, en el laberinto en Y, con estir-



7. LABERINTO EN FORMA DE Y utilizado en el Centro Monell. Es éste el aparato donde se entrena al ratón para que discrimine señales olfativas relacionadas con el complejo MHC. Con un ventilador se fuerza aire a través de las cámaras de olor, situadas a izquierda y derecha. Cada cámara dispone de una tapa abatible que permite la colocación de una fuente de olor, así una muestra de orina de ratón. Las corrientes de aire pasan a continuación por los dos brazos del laberinto, que contienen un tubo con agua, debidamente protegido. Si el ratón sometido a la prueba entra en el brazo correcto, se le permite el acceso al agua. La situación de las muestras en el brazo izquierdo o derecho se decide en función de una serie de números aleatorios. Un ratón entrenado suele tardar dos o tres segundos en elegir entre los brazos. A veces elige sin ninguna pausa, otras prefiere antes husmear la entrada a los brazos.

pes congénicas que diferían en una sola región cromosómica no situada en el 17. Tales estirpes se distinguían, en todo caso, con gran dificultad.

Finalmente, queda la extrapolación de nuestras investigaciones a otras especies. Para el trabajo descrito en este artículo, los ratones resultan imprescindibles, pues se cuenta con estirpes mutantes, congénicas y consanguíneas, esenciales para este tipo de estudios. Pero podemos ya avanzar algo más. El primer paso dado es investigar la capacidad de las ratas, otra especie del orden Rodentia, para distinguir ratones congénicos en razón de los tipos *H*-2. La rata es más hábil y fácil de entrenar que el ratón, por lo que nos valemos de un "olfatómetro" automático, un aparato construido por nosotros mismos que simplifica enormemente los ensayos. Bajo el control de un microordenador, el olfatómetro dirige un flujo de aire sobre una muestra de olor, de entre siete posibles, y suministra a una rata, encerrada en la cámara, una cantidad justa de aire perfumado. (La rata ha sido previamente sometida a un período de sed.) Sensores situados encima y debajo del animal indican cuándo su nariz está en posición adecuada para recibir el estímulo. Si el olor que se le suministra es de los que merece recompensa, la rata debe tocar una varilla situada cerca de la cabeza para recibir una gota de agua. Hemos logrado que las ratas distingan tipos *H*-2 de ratones congénicos.

Existe un abismo, no obstante, entre el reconocimiento de la individualidad genética entre roedores y algo tan familiar como la identificación y rastreo de personas por parte de los perros. Desde el punto de vista experimental, lo obvio en este caso será ensayar, en primer lugar, la capacidad de los perros para discriminar tipos *H*-2 de ratones congénicos, aplazando las complicaciones, debidas a la variación genética global, que habrán de afrontarse cuando se quiera comprobar la capacidad de los perros para discriminar tipos HLA del hombre (predicción realizada por Lewis Thomas hace más de una década). El parentesco entre mamíferos, una clase de vertebrados que evolucionó hace menos de 100 millones de años, nos lleva a pensar que lo que es aplicable al ratón y la rata lo será al menos también a otras especies de mamíferos dotadas de un adecuado sentido del olfato. Cabe, incluso, que personas, en condiciones adecuadas, perciban los tipos HLA de otros individuos, sin que pueda descartarse una posterior respuesta fisiológica.

Los palacios minoicos

En el centro de la rica cultura de la Edad de Bronce de Creta estaba el palacio, que tenía funciones económicas, políticas y religiosas. El estudio de dichas funciones permite reconstruir la sociedad minoica

Peter M. Warren

¿Cómo es posible entender la cultura y la estructura social de una civilización que alcanzó su final hace unos 3500 años? El método más directo sería leer e interpretar los escritos legados por aquella civilización. En algunos casos, sin embargo, la información escrita es de poco provecho. Por ejemplo, la escritura de la cultura minoica de la Creta de la Edad de Bronce (el silabario conocido como Lineal A) todavía no ha sido descifrada. Además, es probable que los escritos minoicos consistan en su mayor parte en relaciones económicas. Aun cuando el Lineal A pudiera descifrarse, tales documentos no iluminarían del todo la cultura minoica. Naturalmente, los objetos no lingüísticos suministran también una considerable información. Una de las mejores fuentes de información acerca de la estructura social y la cultura de la Creta de la Edad de Bronce no es lingüística, sino arquitectónica: los palacios minoicos.

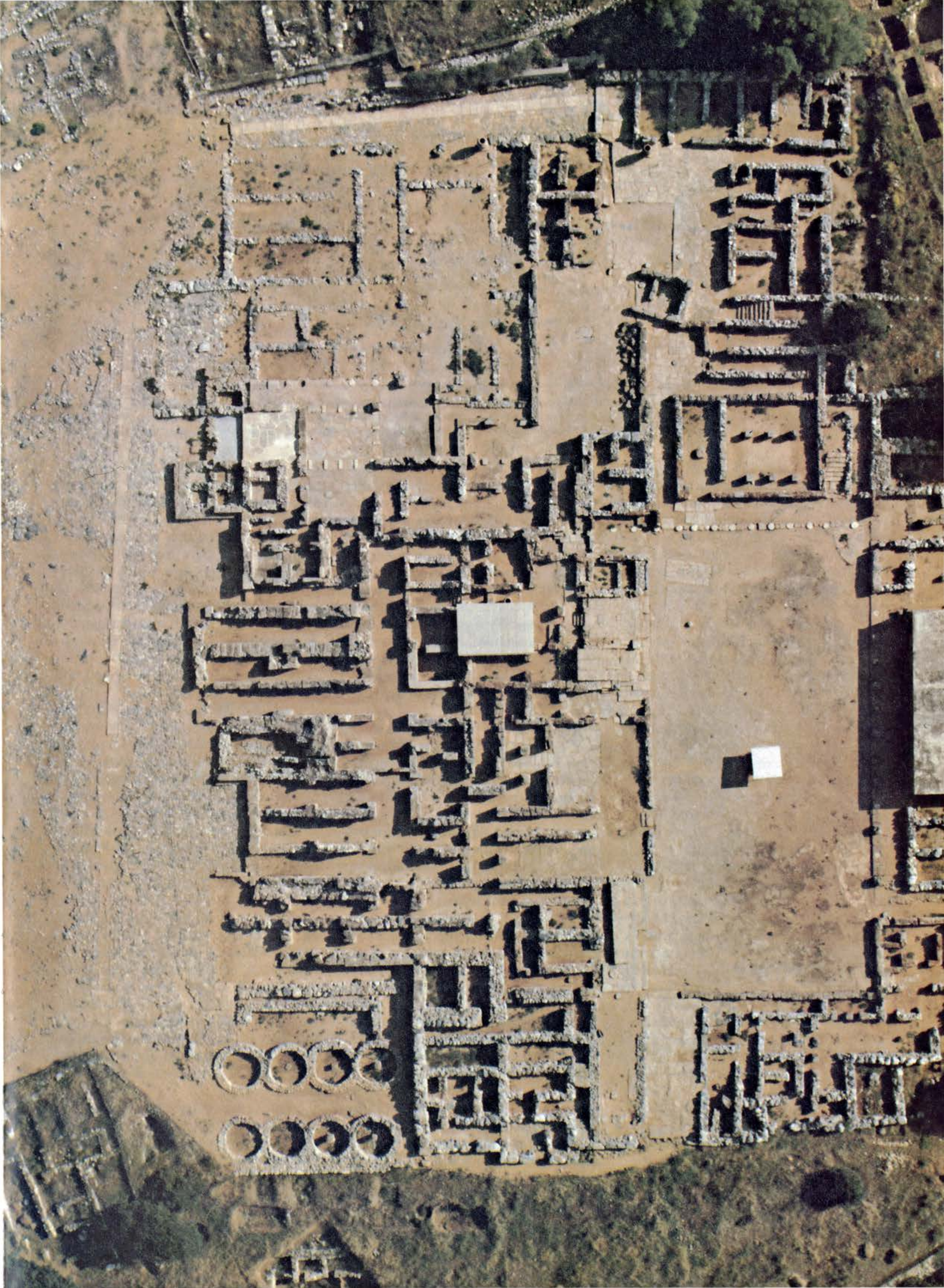
Cuatro palacios minoicos se han excavado hasta ahora, empezando por el descubrimiento del mayor de ellos en Knossós en 1900, por el arqueólogo británico Sir Arthur Evans. Los cuatro ejemplos conocidos comparten unos rasgos que podrían servir como definición de un palacio en su plenitud. Constituían el principal edificio de la localidad, que por lo común era una ciudad minoica de importancia. Cada palacio contaba con un patio central; por lo general había también otros patios. Alrededor del patio central se agrupaban las instalaciones de almacenaje, las áreas de productividad, los archivos de tabletas inscritas, las habitaciones para actividades rituales y las habitaciones para funciones de estado. En estos edificios tan complicados se producía una gran concentración de poder, en ellos vivían tanto las autoridades seculares de las sociedades minoicas como las religiosas. Los trabajos de la investigación reciente se han concentrado en las funciones económicas del palacio. Se ha comprobado que los gobernantes del mismo tenían probablemente mucho que ver con la agricultura de la comarca que rodeaba el palacio y también con el floreciente comercio exterior de Creta.

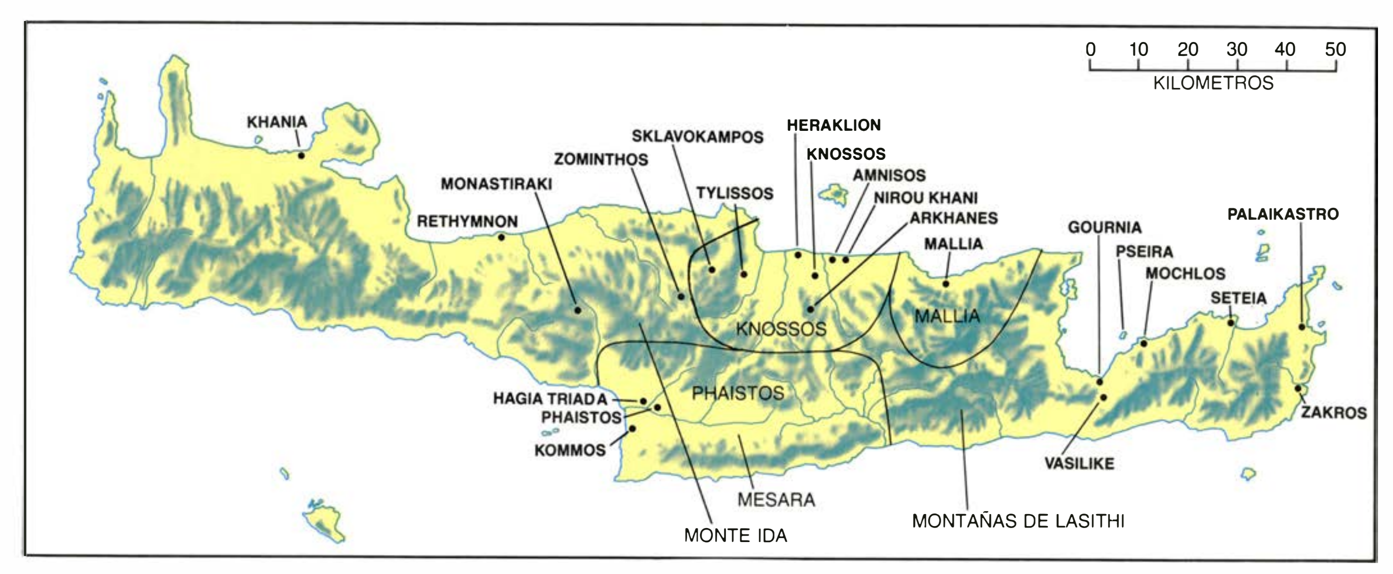
Dado que las funciones del palacio afectaban a todos los órdenes de la vida, el estudio de cómo operaba puede servir de base para la reconstrucción de la sociedad minoica en su integridad. La sociedad de la Edad de Bronce en Creta estaba jerarquizada, pero no dividida. Bajo la autoridad del palacio, los varios grupos sociales parecen haber vivido en una armonía relativa. Además, el arte hallado en su interior refleja una vitalidad y un humanismo que distinguen a Creta de sociedades contemporáneas tales como Egipto y Asiria. El origen de la tradición europea de humanismo e individualismo se atribuye generalmente a los griegos, pero hay un sentido en el que la cultura minoica se puede considerar el primer ejemplo de una tradición característicamente europea. La falta de documentos escritos siempre deja problemas pendientes, pero el estudio de esos edificios puede contribuir grandemente a comprender los éxitos de la sociedad minoica.

Los emplazamientos de los cuatro palacios conocidos comparten un rasgo común significativo: están en la costa o cerca de ella. Knossós, a cinco kilómetros tierra adentro desde la costa norte, domina los fértiles valles del norte de la Creta central. En el sur Phaistós domina la Mesará, única llanura grande de Creta. El palacio de Phaistós fue descubierto también en 1900 y fue excavado por miembros de la Escuela Italiana de Arqueología bajo la dirección de Luigi Pernier. Mallia, al este de Knossós, en la costa norte, puede haber incluido en su territorio las montañas de Lasithi. El arqueólogo griego Joseph Hatzidhakis comenzó a excavar en Mallia en 1915; en la década de 1920 un equipo de la Escuela Francesa de Arqueología se hizo cargo del yacimiento y continuó el trabajo. Zakros, emplazamiento del cuarto palacio, está incrustado en la esquina sudoriental de la isla. Zakros es difícil de alcanzar por tierra y el yacimiento minoico sólo se explica como puerto de primera clase para el tráfico desde el este y el sudeste. El palacio que allí se encuentra es el excavado más recientemente; fue descubierto en la década de 1960 por un equipo griego bajo la dirección de Nicholas Platon.

Es muy posible que haya otros palacios minoicos, además de los cuatro ejemplos conocidos; en Khania, al oeste de la costa norte, hubo probablemente un quinto palacio. El palacio de Khania no se ha excavado, pero su existencia está señalada por el descubrimiento allí de tabletas en Lineal A, que quizá forman parte de un archivo. Otras varias regiones de Creta podrían proporcionar ciudades palaciales, especialmente la comarca de Rethymnon al oeste de Creta central y la comarca de Seteia al este. Además, grandes edificios dominaban el centro de otras ciudades, incluidas Gournia y Monastira-

1. PALACIO DE MALLIA. Al igual que los otros tres palacios minoicos conocidos, se componía de varios edificios pequeños agrupados alrededor de un patio central *(abajo a la derecha)*. El techo que se ve en el patio central cubre un altar. El espacio abierto a la izquierda es el patio occidental. Entre los patios se encuentra el ala occidental, que abarcaba el sector doméstico, los almacenes y habitaciones para ceremonias religiosas. Haciendo frente al ala occidental, al otro lado del patio central, se aprecia el ala oriental, más pequeña, donde se molía el aceite de oliva y fermentaba el vino. Los recintos circulares de la parte baja a la izquierda eran quizá graneros. En su época de esplendor, el palacio ocuparía unos 9800 metros cuadrados. La fotografía es del *Aerial Atlas of Ancient Crete*, de J. Wilson Myers, E. Emlen Myers y Gerald Cadogan, próximo a publicarse. Un globo sin tripulantes sirvió de soporte para la cámara.





2. YACIMIENTOS DE LA EDAD DE BRONCE en Creta. Se concentran en la franja costera de la isla. Los palacios que han sido excavados están en Knossós, Mallia, Phaistós y Zakros. Knossós, Mallia y Phaistós parecen haber dominado grandes regiones *(líneas continuas)*. Zakros, por su parte, parece haber servido principalmente de puerto. El hallazgo de tabletas en Khania indica que un quinto palacio se elevó allí, pero no se ha excavado.

ki. Aunque no palacios en el sentido más estricto, se trata de grandes e importantes edificios minoicos que tienen algunos rasgos en común con los palacios. El hecho de que todos estos yacimientos no fortificados se encuentren en la zona costera apunta la posibilidad de que la posición de Creta fuese un factor significativo en el desarrollo de la civilización en aquella isla. Esta se encontraba a suficiente distancia de las potencias continentales, como los egipcios, los hititas y los griegos micénicos, para desaconsejar frecuentes ataques, pero no lo bastante lejos para impedir un comercio permanente.

Los palacios minoicos, que suponen el logro más cumplido de la cultura de la Edad de Bronce en Creta, culminaron un largo período de desarrollo social en la isla. La Edad de Bronce, que duró desde aproximadamente el 3000 hasta 1000 a. C., estuvo precedida de 3000 años en que los habitantes neolíticos de Creta implantaron con éxito la agricultura y la ganadería. Las realizaciones neolíticas en materia de granjas constituyó la base material de la cultura minoica: una rica economía agrícola de cereales, olivos, viñas y rebaños. A continuación del neolítico viene la Edad de Bronce prepalacial, o primera Edad de Bronce, que se extiende desde más o menos el 3000 al 1930 a.C.

En el período prepalacial tres factores contribuyeron a crear las condiciones sociales necesarias para el establecimiento de los palacios. La primera de ellas fue el establecimiento de poblados agrícolas estrechamente unidos. La excavación de varios poblados prepalaciales indica que las aldeas de la primera Edad de Bronce eran muy compactas. Muchas de las casas, apretadas unas con otras, compartían unas mismas paredes, dando a la aldea una forma global que recuerda a una colmena. En tales aldeas los cretenses de la primera Edad de Bronce llevaban una vida comunal en la que los vínculos eran estrechos; hay pocos indicios de escala social en las aldeas. El segundo factor fue el probable desarrollo, dentro de estas comunidades estrechamente unidas, de familias nucleares o extensas que formaban las subunidades de la aldea.

El tercer factor fue el establecimiento de territorios destinados al uso de un poblado particular. Estos territorios eran comarcas pequeñas que evolucionaban mediante la explotación agrícola continuada. Los granjeros de la primera Edad de Bronce vivían próximos unos a otros, e iban andando a los campos, en gran medida como hacen sus modernos equivalentes en Creta. Como consecuencia, el territorio correspondiente a una aldea puede haber estado impuesto por la distancia que un labriego podía recorrer diariamente a pie para ir al campo y volver. Además de la delimitación geográfica, los poblados agrícolas estaban definidos socialmente por modos de vida sancionados por la costumbre.

A lo largo de un período que va desde 2200 aproximadamente hasta el 1900 a.C., algunos centros prepalaciales aumentaron de tamaño e importancia. Un aspecto del aumento de importancia es que algunas comunidades parecen haber dominado territorios mayores. Cada uno de los territorios mayores, o provincias, puede haber estado dominado por una familia poderosa que construyó y ocupó lo que al fin se convirtió en un palacio. El proceso por el que las provincias se delimitaron y se estableció en ellas la autoridad no está bien estudiado. El entorno físico, libre de amenazas, que rodea los palacios indica, sin embargo, que éstos se levantaron con la aquiescencia colectiva del resto de la comunidad. Ninguno de los palacios se encuentra en una posición dominante desde el punto de vista físico, y a los cuatro se llega desde las ciudades que los rodean.

La Edad de los Palacios duró del 1930 a 1450 a.C. y acabó en un enorme proceso de destrucción cuya naturaleza aún se discute. Durante aquellos cinco siglos se verificó un avance continuo en el trazado arquitectónico. Entre los especialistas de la Creta minoica se realiza a menudo una división entre el Primer (o Viejo) Período de los Palacios (1930 a 1700 a.C.) y el Segundo (o Nuevo) Período de los Palacios (1700 a 1450 a.C.); un considerable proceso de destrucción, causado probablemente por un terremoto, dividió las dos épocas. La historia arquitectónica de los palacios es en la práctica mucho más compleja de lo que indica tal división. Todos fueron seguramente construidos y reconstruidos muchas veces. En todo este proceso no existen indicios de invasores extranjeros; lo que se observa es la superación y la elaboración de los estilos nativos.

El resultado final de esta prolongada superación arquitectónica fue el diseño del palacio en su cenit hacia 1450 a.C. Como se indicó más arriba, ese trazado comprendía muchos edificios pequeños orlando un patio central. Algunos elementos del trazado tenían precedentes

minoicos. La planta del primitivo palacio de Phaistós muestra claramente un dispositivo celular de edificios pequeños, enlazados por corredores, que recuerda los trazados de colmena de los poblados de la primera Edad de Bronce. Otros elementos del trazado no parecen tener antecedentes cretenses y pueden haber sido importados. La monumentalidad de los palacios y el dispositivo de edificios alrededor de un patio central pueden verse en palacios contemporáneos del Próximo Oriente tales como el de Mari, ciudad mesopotámica a orillas del Eufrates. Hay constancia de que hacia 1700 a.C. los minoicos tenían relaciones comerciales con Mari, y algunas ideas arquitectónicas pudieron llevarse a Creta en unión de los artículos del comercio.

Aunque los palacios compartían un plano arquitectónico básico, diferían considerablemente de tamaño y esplendor. Knossós era el más soberbio. Se supone que los palacios eran aproximadamente rectangulares, y dejando margen para partes que se hayan perdido, viene a resultar que los edificios y el patio central de Knossós abarcaban 17.400 metros cuadrados. La zona equivalente en Mallia era de 9800 metros cuadrados, la de Phaistós 8300 y la de Zakros 4250. En Knossós había por lo menos cuatro pisos altos en el ala oriental; todos los palacios tenían por lo menos un piso alto. En Knossós se ha trabajado más que en ninguno de los otros palacios, pero a pesar de su preeminencia, Knossós tiene una desventaja significativa para el estudio de la cultura minoica pura. Aunque fue destruido en 1450 a.C., junto con los demás palacios, Knossós volvió a ser ocupado posteriormente por griegos micénicos. Los ocupantes griegos han podido muy bien aprender a escribir gracias a los minoicos: la escritura micénica, la transcripción del griego conocida como Lineal B, emplea símbolos minoicos. Así, el palacio cretense mayor y más rico y el que tiene mayor número de documentos económicos, asistió a una ocupación última dominada no por minoicos sino por inmigrantes griegos.

Los cuatro palacios conocidos diferían no sólo en magnificencia, sino también en la minuciosa ordenación de sus zonas de actividad. Había por lo general un ala occidental que se extendía desde el patio central hasta un patio occidental. El piso bajo de este ala se dividía en dos sectores: almacenes llenos de grandes tinajas, llamadas *píthoi,* y salas para ceremonias religiosas. En Mallia las habitaciones de ceremonia estaban en línea con un altar en el patio central. Las funciones de la planta alta del ala oriental variaban de un palacio a otro. En Knossós el piso superior guardaba un tesoro donde se almacenaban



3. PALACIO DE KNOSSOS, descubierto por Sir Arthur Evans en el año 1900. Fue el más grandioso de los cuatro palacios minoicos conocidos. Ocuparía unos 17.400 metros cuadrados. La fotografía está hecha mirando al sur. El patio principal se encuentra en el centro; el patio occidental a la derecha. El ala occidental, entre ambos patios, tenía dos pisos. Almacenes y habitaciones para ceremonias religiosas ocupaban la planta baja; archivos de tabletas inscritas, un tesoro del santuario (que contenía vasos de piedra) y salas de recepción oficial se instalaban en el piso superior. El ala oriental (*a la extrema izquierda*) se destinaba a la vivienda. Contaba, por lo menos, con cuatro pisos y se llegaba a ella por la Gran Escalera, que está cubierta por el menor de los techos que flanquean el patio central. El ala oriental albergaba un cuarto de baño y un retrete, abastecidos de agua corriente. Raymond V. Schoder, que se halla adscrito a la Loyola University, provisto de una cámara sostenida a mano, sacó la fotografía a través de la puerta de carga, abierta, de un DC-3.

vasijas de piedra para un santuario, un archivo de tabletas y un grupo de salas de recepción para ceremonias de estado. En Zakros, por el contrario, el tesoro del santuario y los archivos se hallaban en la planta baja del ala occidental; el piso superior albergaba talleres y almacenes de vasijas para quemar incienso.

Las otras salas también diferían en sus detalles y funciones. En Knossós y Zakros el ala oriental tenía las que se consideran habitualmente viviendas de los señores. En Knossós se llegaba a esta zona residencial por la Gran Escalera, una maravilla de ingeniería arquitectónica. Allí la vivienda incluye un cuarto de baño y un retrete provistos de agua corriente. En Zakros había una perfecta piscina circular. Por el contrario, en Mallia el elemento principal de la parte oriental del palacio tenía carácter industrial: un dispositivo esmeradamente construido de soportes de tinajas y canaletas para la obtención de aceite y quizá también de vino. En Knossós y Zakros las instalaciones industriales aparecen en otras partes del palacio. En el sector norte-oriental de Knossós había un taller de un glíptico o tallista de piedra y posiblemente otro de un alfarero.

Las habitaciones-santuarios que dan al patio central en varios palacios, y el altar hallado en el patio de Mallia, indican con claridad que la zona central abierta servía de escenario a ceremonias religiosas. Observando la existencia de rejas de protección en el patio principal de Mallia y de Phahistós, algunos investigadores han sostenido la teoría de que el patio central servía



4. PALACIO DE PHAISTOS. Comparte el plano de conjunto de los otros palacios minoicos. El patio central está en la parte baja; el patio occidental, en la parte alta, a la izquierda. Como en los otros palacios, los almacenes se encontraban entre los patios, en el ala occidental. Sin embargo, el palacio de Phaistós tiene algunos rasgos únicos, a saber: la gran escalera que sube del patio occidental y las habitaciones columnadas residenciales del ala norte *(bajo techos)*. Las alas sur y este del palacio han desaparecido a causa de la erosión. Contando con las partes perdidas, el palacio de Phaistós ocuparía unos 8300 metros cuadrados. A la izquierda se encuentran casas y silos circulares del período antiguo. La fotografía es del *Aerial Atlas of Ancient Crete*.

también de escenario a los famosos juegos de toros minoicos. Sin embargo, las salas de culto, no defendidas, que dan al patio principal de varios palacios y el frágil altar del patio de Mallia hacen improbable que los toros corretearan por la zona descubierta. En Knossós y Mallia los juegos de toros pueden haberse realizado al noroeste del palacio. Los edificios existentes allí han podido servir de graderíos desde donde los habitantes de la ciudad palacial veían cómo jóvenes atletas eran embestidos por los toros.

Cuando se toman en consideración sus funciones económicas, religiosas y políticas, hay que entender los palacios como la principal expresión material de la estructura de la sociedad minoica. Un modo práctico de dilucidar dicha estructura es examinar el palacio en tres contextos, progresivamente más amplios: la ciudad, la provincia y el mundo. Cada palacio se encontraba en el corazón de una ciudad. Las ciudades palaciales eran grandes y sumamente desarrolladas. En Knossós, la mayor de todas ellas, la zona ocupada intensivamente abarcaba unas 75 hectáreas durante la época de los palacios. En contraste, Palaikastro, en Creta oriental, una de las mayores ciudades excavadas carentes de palacio, comprendía probablemente entre 25 y 35 hectáreas.

Las ciudades palaciales ofrecían a menudo grandes e impresionantes casas particulares. Las casas de Knossós estaban construidas con sillería de la más fina labra y juntas regulares, lo mismo que lo estaba el palacio. En Mallia, a comienzos de la Edad de los Palacios, se alzaba un grupo de importantes edificios, no relacionados con el palacio, que tenían habitaciones de culto y talleres de tamaño familiar adosados al exterior. Jean-Claude Poursat, de la Escuela Francesa de Arqueología de Atenas, ha sostenido que este grupo de edificios albergaba a las autoridades religiosas de la comunidad. De ser así, habría una división entre la autoridad sagrada y la secular en la etapa primitiva de la Edad de los Palacios, puesto que los señores seculares vivían indudablemente en el palacio. Es sabido que en la última parte de la Edad de los Palacios, después de que los edificios del Minoico Medio acabados de citar hubiesen caído en desuso, ambos tipos de autoridad estaban concentrados en el palacio. Es posible que en los tiempos del palacio la estructura autoritaria de la sociedad minoica se consolidase, con el resultado de que la autoridad del mismo saliese aún más reforzada.

La cuestión fundamental con respecto a las ciudades es la de sus relaciones con el palacio. La gama de posibilidades va desde un control absoluto por parte de éste hasta una independencia completa de la ciudad. La relación de época micénica, post-minoica, que se ha aducido partiendo de tabletas del Lineal B, comportaba un elevado grado de control palacial, incluido un sistema uniforme de contribución en especie a través del reino. En ausencia de documentos que contengan información social explícita, la relación entre ciudad y palacio en época minoica no se puede caracterizar con precisión. Las pruebas que tenemos sobre el uso de los espacios y de los edificios indican, sin embargo, que el sistema minoico no estaba tan centralizado como el micénico. Por ejemplo, en Knossós hay una serie de grandes mansiones situadas en la inmediata vecindad del palacio. Los habitantes de las mansiones deben haber tenido mucho contacto con los regidores, incluido el acceso fácil al palacio. Además, en Zakros no hay una delimitación estricta física o arquitectónica entre el palacio y las casas; los últimos edificios de aquél se extienden hacia la ciudad sin ruptura. Estos dispositivos significan que la jerarquía social minoica estaba acompañada de poca división o conflicto sociales. La combinación de jerarquías y las armoniosas relaciones son la clave para entender el éxito de la civilización minoica.

La segunda zona de organización económica y social es el territorio, dependiente o controlado, de más allá de la ciudad. No se puede probar que haya habido un territorio fijo para cada palacio, pero los emplazamientos de tres de ellos apuntan a territorios naturales: el norte de la Creta Central para Knossós, el sur de la Creta Central y la llanura de Mesará para Phaistós, y la bahía de Mallia y quizá las montañas de Lasithi para Mallia. En una sociedad agrícola como la de los minoicos, el control territorial conllevaría indudablemente la apropiación de una parte considerable del excedente agrícola de la región. El análisis de la capacidad de almacenamiento de los palacios indica que los regidores recibían el excedente de un territorio bastante grande de los alrededores de sus sedes.

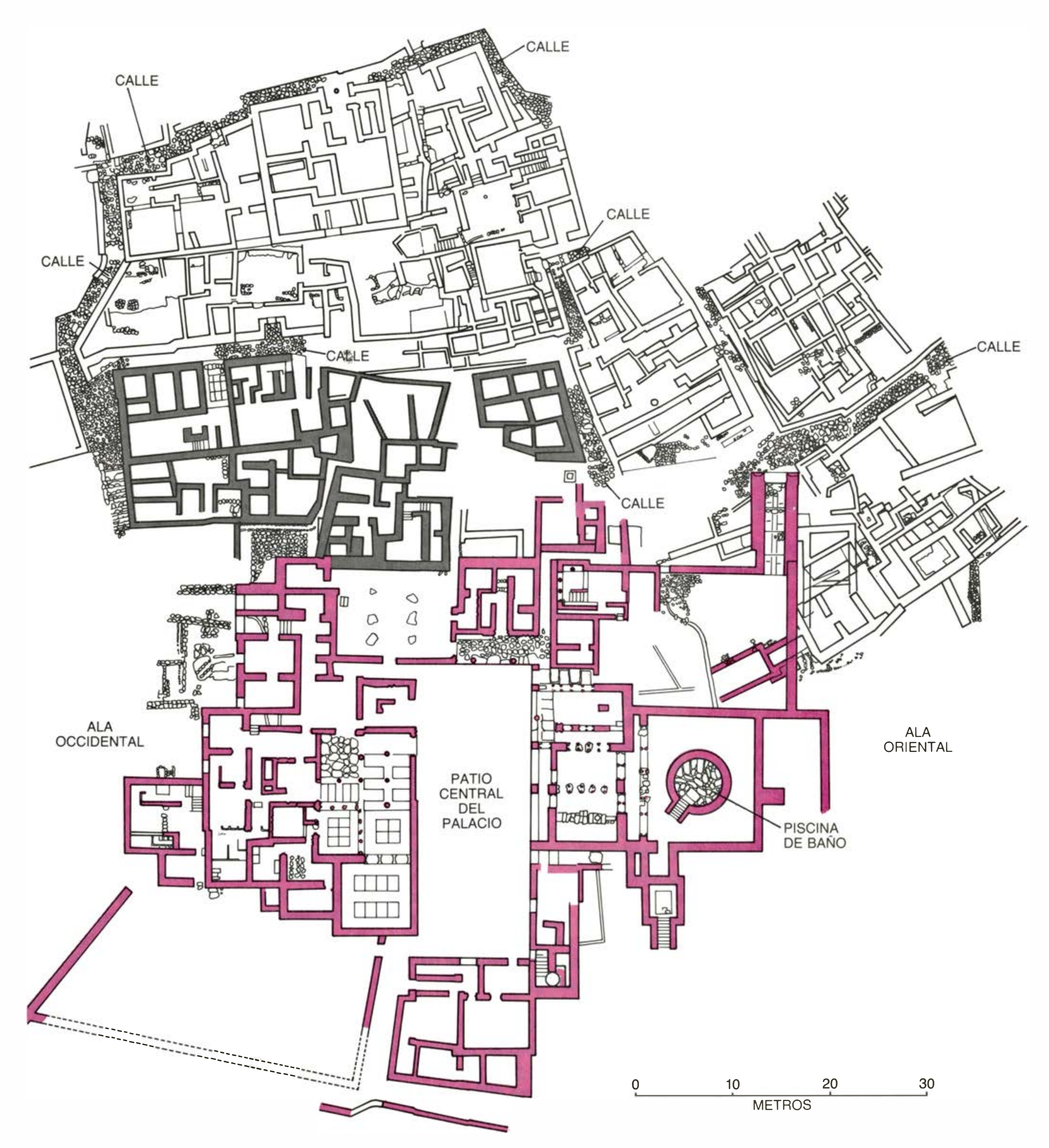
J.W. Graham, de la Universidad de Toronto, ha demostrado que los almacenes del oeste del palacio de Knossós han podido albergar 420 *píthoi*, cada uno de ellos con una capacidad de 586 litros. Por tanto, la capacidad máxima de almacenamiento de esos silos del oeste era de unos 246.000 litros. Supóngase que un tercio de esa capacidad se asignase a aceite de oliva, una fracción demasiado pequeña quizá. Calculando por patrones modernos, para mantener llenas esas tinajas hubieran hecho falta de 16.000 a 32.000 olivos. En el supuesto de que la distribución de los árboles en los olivares fuese la misma que en tiempos modernos (de 10 a 20 árboles por cada mil metros cuadrados), los almacenes del palacio podrían contener la producción de unas 320 hectáreas. Si los dos tercios restantes de la capacidad de almacenaje fuesen ocupados por cereales y vino, el área de la tierra bajo cultivo hubiera superado, de lejos, las 320 hectáreas. Cosechas importantes, como las de coriandro y azafrán, hubieran ocupado otras tierras. Además de esto, algunas de las casas particulares de Knossós tenían sus propios locales de almacenamiento, lo que equivale a decir que palacio recibía sólo una parte de la producción de la región. Así pues, a la ciudad-palacio podría haber ido gran parte de la producción de la región circundante, de unas mil hectáreas de extensión. Esa región, situada dentro del territorio natural, mucho mayor, del palacio, comprendía el valle de Knossós y la tierra situada al norte, a las afueras de la ciudad moderna de Heráklion.

Un cálculo semejante, aunque algo menos preciso, puede hacerse para Phaistós. Es posible que en tiempos palaciales los regidores de Phaistós controlasen entera la Mesará. El área de la Mesará (bajo una altitud de 200 metros) tiene unas 18.000 hectáreas. La producción de trigo en Creta en la década de 1930 era de unos 140 kilos por hectárea y año. Suponiendo que la producción fuese la misma en tiempos minoicos, y también que la llanura entera estuviese dedicada al trigo, la Mesará podría haber producido alrededor de 2,5 millones de kilos de trigo al año. Entre los registros de Knossós hay tabletas que pudieran indicar la producción de la Mesará. Si las tabletas se han interpretado correctamente, señalan una producción máxima de trigo de la Mesará de unos 775.000 kilos. Esa cifra es algo menor que la capacidad de la llanura, pero hay varias cantidades desconocidas en el cálculo. A ello se añade que es improbable que en la Mesará no se plantasen más cosechas que las de trigo. A pesar de estas inseguridades, los cálculos señalan, dentro de un orden de magnitud, cuánta tierra agrícola controlaba el palacio.

Si los ocupantes del palacio eran capaces de apropiarse del excedente agrícola de una comarca bastante extensa, probablemente tenían represen-

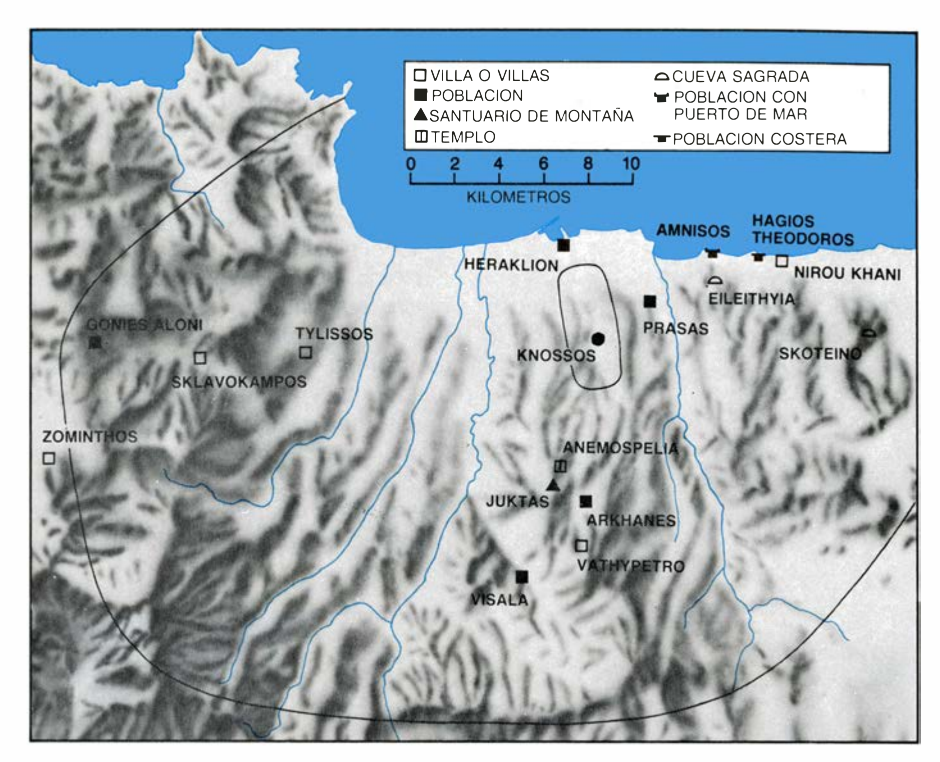
tantes en la campiña. Situadas fuera de las ciudades palaciales hay localidades que han sido descritas de varias maneras como casas de campo, villas, granjas y fincas. En el aspecto funcional las villas parecían palacios en miniatura, sin el gran patio central. Las villas albergaban almacenes, molinos de aceite y lagares, telares, oratorios y otras habitaciones más suntuosas. No cabe suponer que las villas fuesen satélites de los palacios, que colaborasen en el sistema de recoger la producción del campo. Quizá fueran completamente independientes del palacio, y los productos que almacenaban pueden haber sido los propios. Una tercera posibilidad es que las villas no fuesen ni del todo independientes ni completamente dependientes del palacio. Harán falta ulteriores investigaciones para decidir entre estas alternativas.

Algunas mansiones tenían funciones que no guardaban relación alguna con la recogida de la producción, y las había que quizás estuvieron fuera del todo de la órbita del palacio. Las villas de Nírou Khani, Sklavokampos y los edificios recientemente descubiertos en Zóminthos, que cabalga sobre un críti-



5. EL PALACIO Y LA CIUDAD en la sociedad minoica estaban íntimamente relacionados, como lo manifiesta el plano de Zakros. Las construcciones del palacio aparecen señaladas aquí en color, las de la ciudad en blanco y los edificios que no se pueden atribuir con seguridad a ninguna de estas categorías en gris. La ausencia de fortificaciones, e incluso la falta de un límite físico claro entre el palacio y la ciudad significan que la autoridad del palacio no se imponía por la fuerza. El sector doméstico en Zakros se alojaba en el ala oriental del palacio; la construcción circular era una piscina para baño. El lado meridional del palacio albergaba talleres donde algunos artesanos fabricaban perfumes, objetos de bronce, cristal de roca, marfil y cerámica.

co nudo de carreteras en el monte Ida, pueden haber sido estaciones de carreteras de importancia económica. En Tylissós y Mochlos se hallaban caseríos que pueden interpretarse como comunidades dominantes de territorios terrestres o zonas marítimas. La relación de los caseríos con el palacio no está aún bien determinada, pero algunos de ellos, incluido Tylissós, quedan lo bastante lejos del palacio para suponerlos independientes. Además de los caseríos, la región que rodeaba el palacio incluía ciudades. Estas diferían por su tamaño y riqueza de los objetos reunidos. El tamaño, forma y posición geográfica de algunas ciudades indican que eran independientes de los palacios. De este grupo destacan Gournia, Pseira y otras en la bahía de Mirabella.



6. PALACIO Y PROVINCIA formaban probablemente una unidad política y económica. Las líneas continuas indican el territorio natural de Knossós y la región más pequeña dentro de ese territorio natural, del que el palacio recibía los productos agrícolas. Los almacenes del palacio de Knossós eran lo bastante grandes para albergar gran parte del excedente agrícola de la región más pequeña, que se extiende a lo largo de unas 1000 hectáreas. Dentro del territorio de Knossós, había varios tipos de estaciones. Las "villas" eran casas grandes, aisladas. Algunas las habitarían quienes administraban la agricultura del palacio. Otras, incluidas las de Nirou Khani, Sklavokampos y Zóminthos, pueden haber sido estaciones de carreteras importantes. La mayoría de los poblados estaban dominados por Knossós, pero dos de ellos quizá gozaron de cierta independencia: Arkhanes, una ciudad rica, y la distante Tylissós.

Dos ciudades en particular plantean problemas interesantes acerca del equilibrio entre independencia y dependencia: Arkhanes y Hagia Tríada. Ambas estaciones están próximas a palacios, pero ambas parecen haber sido más que ciudades satélites. Arkhanes está a 10 kilómetros al sur de Knossós. Los ricos cementerios encontrados allí indican que la ciudad tuvo una historia larga e independiente. Es más: durante el Segundo Período de los Palacios, Arkhanes poseyó hermosos edificios de cantería de tipo palacial y elementos arquitectónicos igualmente palaciales; en un determinado lugar se encontraron incluso tabletas del Lineal A. Tales hallazgos significan que Arkhanes era mucho más que un satélite de Knossós. El emplazamiento de la ciudad y la semejanza estilística de los artefactos encontrados en ella con los artefactos encontrados en Knossós indican, sin embargo, que hubo un cierto grado de dependencia con respecto al palacio.

Hagia Tríada también combina aspectos de dependencia e independencia. La ciudad, situada a tres kilómetros al oeste de Phaistós, es un yacimiento especialmente rico donde se han encontrado algunas de las vasijas rituales minoicas más hermosas junto con un gran depósito de lingotes de cobre. Estos hallazgos proceden de un edificio de buen tamaño que ciertos estudiosos han interpretado como palacio. Los trabajos recientes, sin embargo, revelan que el "palacio" era en realidad dos mansiones unidas. De ser así, Hagia Tríada pudiera haberse parecido a Tylissós como caserío independiente. La proximidad a Phaistós, por otra parte, indica claramente cierta dependencia de aquel palacio. Es posible que Hagia Tríada tuviera varios cometidos, sirviendo como centro religioso y también organizando la agricultura para Phaistós en la Mesará occidental.

El modelo de una capital que deja claro su control del territorio que le corresponde, mediante la adquisición y el almacenamiento del excedente agrícola, se ajusta a lo que sabemos de Knossós, Mallia y Phaistós. No cabe decir lo mismo de Zakros. Metido en una hoya de montañas en la costa sudoriental de la isla, Zakros no posee un territorio natural en el mismo sentido que las demás ciudades palaciales. Es claro que Zakros era una ciudad portuaria, no sólo por su posición, sino también por los depósitos de marfil importado, cobre y piedras semipreciosas hallados en el palacio. Parece probable que Zakros fuese una entidad independiente, con su propio gobernante y sus archivos administrativos. Sin embargo, hay por lo menos dos factores que apuntan hacia una conexión especial entre Zakros y Knossós. En primer lugar, un grupo grande de improntas de sellos de arcilla, halladas en una de las casas, se relaciona con improntas encontradas en Knossós. En segundo lugar, tanto el palacio como la ciudad han proporcionado una cantidad considerable de cerámica fina que casi con certeza vino de los alfares de Knossós. Quizá Zakros fuese el puerto comercial oriental de Knossós, el primer apeadero para barcos que zarpasen del sudeste del Mediterráneo. Si Zakros servía también como primer puerto de arribada para barcos que surcaban el mar de la costa meridional, en este caso Phaistós podría tener algo que ver con sus negocios; pero la conexión con Knossós parece más fuerte.

El estatuto de Zakros como puerto tiene que ver directamente con el tercero y más amplio contexto en que se movía el palacio: el mundo de más allá de Creta. La sociedad minoica mantenía intensos contactos con el continente, especialmente bajo la forma de pacíficas relaciones comerciales. Los puertos eran el punto de entrada en la red de contactos comerciales. Mallia, en la costa norte, era su propio puerto. Las ciudades portuarias de Amnisos y Kommos se encuentran lo bastante próximas a los palacios de Knossós y Phaistos, respectivamente, para indicar que eran los puertos de aquellos palacios. Desde dichos puertos los productos minoicos eran transportados a puntos tan lejanos como Delfos en el continente griego, Troya, Chipre, la costa del Líbano y Egipto. Más cerca de Creta había regiones de contacto social y económico mucho más intenso, en

particular las islas Cicladas y el nordeste del Peloponeso. Es más: en algunos yacimientos del Egeo parece que hubo comunidades cretenses entre la población local; tales comunidades ultramarinas eran un resultado natural de la expansión económica y demográfica de Creta.

La economía minoica triunfante y expansiva requería también importaciones. Las necesidades principales de la isla eran los metales: cobre, oro, plomo, plata y estaño. Otras mercancías codiciadas eran el marfil y piedras preciosas para tallar como recipientes y sellos. El problema más acuciante en relación con el comercio es el de su control. En el Egipto contemporáneo el comercio estaba controlado por los gobernantes. En Mesopotamia y ciudades de la costa del Líbano tales como Ugarit había en cambio una clase casi independiente de mercaderes.

¿Se asemejaba el sistema minoico al egipcio o al mesopotámico? En ausencia de archivos escritos no se puede responder a esta pregunta de una manera precisa. Sin embargo, es curioso que las mercancías importadas halladas en ciudades minoicas no se limiten a los palacios: importanciones a granel, marfil y piedras caras en casas. También en casas se han encontrado lingotes de cobre, aunque el mayor depósito no palacial, el de Hagia Tríada, es un hallazgo ambiguo. Se diría que un modelo mesopotámico-sirio de estructura económica se ajusta más a la Creta minoica que el egipcio. El modelo mesopotámico otorga el control global del comercio al palacio, pero se muestra sumamente tolerante con una clase mercantil casi independiente.

La coordenada de ciudad, provincia y mundo forma la base del esquema de los grupos que componían la sociedad minoica. El esquema comienza con los ocupantes del palacio mismo. Quién regía la Creta minoica no se sabe con certeza. Dicho queda más arriba que la construcción de los palacios fue parte de un proceso de unificación de grandes territorios. Este proceso puede



7. PALACIO Y MUNDO EXTERIOR DE CRETA se enlazaban a través del denso tráfico exterior de la isla. La Creta minoica tenía una economía de exportación. Las importaciones principales eran materias primas: metales, marfil y piedras finas, con que labrar con ellos vasijas ceremoniales y sellos para hacer improntas en el barro. Las exportaciones consistían en productos acabados, particularmente cerámica. La influencia de los minoicos se propagó a través del Mediterráneo oriental. El contacto más intenso fue con el continente griego y las islas próximas, donde había comunidades cretenses. Es probable que el comercio en la sociedad minoica estuviese en manos de una clase de mercaderes semiindependientes, sujeta a la autoridad del palacio.

haber sido realizado por familias poderosas que fundaron dinastías, al tiempo que construían los palacios. Y sin embargo, poco puede decirse de los regidores minoicos individuales; ni siquiera su sexo es conocido. Los tres miembros de la dinastía minoica ensalzados por la leyenda son varones: Minos y sus sombríos hermanos Radamanto y Sarpedon. Sin embargo, sólidas razones basadas en documentación iconográfica del palacio de Knossós parecen indicar que el mando supremo estaba en manos de una suprema sacerdotisa. (Mallia, Phaistós y Zakros son mudos arqueológicamente en la cuestión del sexo del regidor supremo.) Fuese o no fuese femenino el regidor de la sociedad minoica, otros hallazgos manifiestan que algunos grupos de mujeres se hallaban en pie de igualdad con los hombres, o quizá de preeminencia, una posición sorprendente en la Edad de Bronce.

Por debajo de los regidores del palacio deben haber estado en la escala social altos dignatarios que organizaban la agricultura. Estos funcionarios pueden haber sido los ocupantes de las mansiones diseminadas por el territorio provincial. Estos podrían proceder de la familia gobernante o de familias independientes. Un papel destacado también lo representaban los sacerdotes y sacerdotisas. Además, debió existir un grupo que organizaba y llevaba en sus manos el importante comercio ultramarino. Dicho queda que los mercaderes costituirían una clase semiautónoma de comerciantes dentro de la sociedad. En todos los niveles de la sociedad minoica habría también artesanos, escalonados desde empleados del palacio hasta los que gestionaban los talleres de las ciudades. En una sociedad agrícola como la de Creta de la Edad de Bronce no hay que decir que la mayoría de la población estaría formada por granjeros, obreros del campo o pastores.

La sociedad jerarquizada y pacífica compuesta por estos grupos sufrió una destrucción catastrófica alrededor de 1450 a.C. El agente físico de la destrucción fue el fuego. Pero el origen de éste se desconoce. Se ha hablado de tensiones internas que pudiesen haber desembocado en una guerra civil o en una rebelión, en una invasión micénica y en una erupción volcánica de grandes proporciones. Hay pocos indicios de tensión interna en los registros arqueológicos, y parece improbable que los advenedizos micénicos que aparecen después de la destrucción hubiesen arrastrado a la ruina económica todo lo que acababan de ocupar. La tercera posibilidad es quizá la más verosímil: el terremoto y otros efectos generados por la erupción cataclísmica del volcán existente en la cercana isla de Thera (Santorín). Sabido es que el volcán experimentó una erupción a comienzos de la Edad de Bronce tardía. Pero las opiniones se han dividido entre una fecha hacia el 1500 a.C. y otra hacia el 1450. Investigaciones recientes, efectuadas en Groenlandia en núcleos de hielo que contienen acidez que puede ser datada por su profundidad en el hielo, apoyan la fecha más reciente, como lo hace la información paleomagnética de Thera y Creta. El grado de destrucción en Creta es compatible con los efectos de una violenta erupción volcánica.

Aunque se llegue a comprender el fin de la civilización minoica, quedará mucho por aprender. El trabajo que se está realizando sobre el mecanismo funcional de los palacios minoicos está concentrado en varias cuestiones socioeconómicas. ¿Surgieron los palacios como resultado de un extenso y creciente desarrollo, o nacieron acaso de repente después de una acumulación de energía social? ¿Cuál fue la forma precisa de la jerarquía social de los poblados de la Edad de Bronce? ¿Qué posición ocupaba la mujer? ¿Qué organización respaldaba el floreciente tráfico comercial con el exterior?

Por importantes que sean estos problemas, ninguno de ellos afecta al más fundamental de todos: ¿cuál era la raíz de la relativa armonía de la sociedad minoica? En el momento culminante de la Edad de los Palacios en 1450 a.C. ninguna población minoica estaba fortificada. Todas se encontraban en lugares fácilmente accesibles y difícilmente defendibles. La ubicación geográfica de Creta puede explicar sus relaciones pacíficas con las potencias continentales, pero no justificar la ausencia aparente de conflictos armados dentro de la sociedad cretense durante el período palacial. Se ha aducido que las prácticas rituales tan aparatosas de la sociedad minoica han podido servir para canalizar los impulsos agresivos. Las observaciones de este tipo, sin embargo, sirven solamente para enmascarar la cuestión. En el fondo de lo que llamamos civilización está la sublimación de los impulsos agresivos, su redirección hacia fines más altos y más abstractos que el matar seres humanos. Por qué esa capacidad apareció en una forma sumamente desarrollada entre los pobladores marineros de una isla pequeña, bañada por el sol, alrededor del 2000 a.C., sigue siendo un misterio profundo e intrigante.

Agua fósil bajo la península de Sinaí-Negev

Estudiando el agua que mana de fuentes y pozos dispersos de los desiertos de Sinaí y Negev, los hidrogeólogos han identificado un extenso acuífero formado a lo largo de la última glaciación

Arie Issar

Los grandes manantiales ‘Ayun Musa del confín noroccidental del desierto de Sinaí parecen inagotables. Sus aguas inundan una vasta marisma parcialmente cubierta de gruesos tapices de junco, tamariscos y datileras. Al emerger el agua, sus carbonatos y sulfatos precipitan y forman montículos de toba porosa. Los montículos alcanzan ya varios metros, lo que indica que las fuentes han existido desde hace miles o decenas de miles de años. Pasajes bíblicos confirman la antigüedad de los manantiales: "Así Moisés sacó a Israel del mar (de los Juncos) Rojo y fueron a salir al desierto de Shur y anduvieron tres días por él sin encontrar agua. Y cuando llegaron a Marah, no pudieron beber las aguas por ser amargas. Por eso al lugar se le llamó Marah" (Exodo 15: 22-23). "Mar" se traduce por "amargo" en hebreo y ‘Ayun Musa por "Fuentes de Moisés" en árabe.

¿De dónde brota este poderoso caudal de los límites del desierto? Para los hidrogeólogos, los manantiales de ‘Ayun Musa constituyen un desagüe de un acuífero subterráneo, o embalse, que almacena un ingente volumen de agua. Tiene el agua miles de años de antigüedad, y por eso se la llama paleoagua o agua fósil. La presión artesiana la empuja hacia la superficie. Si explotaran el acuífero, Egipto e Israel podrían convertir vastas extensiones de los desiertos de la península de Sinaí-Negev en regiones agrícolas.

Cuatro líneas diferentes de pruebas apoyan la conclusión de que tal acuífero subyace a la península entera. Prospecciones geológicas revelan lo apropiado del medio para ese curso subterráneo. La datación por carbono 14 y análisis químicos e isotópicos indican que las aguas de manantiales distantes entre sí centenares de kilómetros presentan características tan sorprendentemente parecidas que deben brotar de una fuente común. Los estudios químicos e isotópicos, sumados a los registros arqueológicos, inducen a pensar que el acuífero alberga agua de lluvia que quedó retenida durante la glaciación más reciente.

Imágenes desde naves espaciales de la región revelan características superficiales concordantes con una geología subterránea que podría abrigar un acuífero. La forma triangular de la península de Sinaí (Egipto) y Negev (Israel) que constituye una zona de transición entre Asia y Africa es particularmente llamativa. Desde la panorámica del espacio, las dos regiones divididas por la frontera política entre Egipto e Israel no pueden distinguirse geográficamente una de otra. El Sinaí y el Negev han existido como una sola unidad geológica durante la mayor parte de su historia. Además, esta unidad comparte rasgos comunes con las tierras emergidas que la rodean: la península de Sinaí se parece a los desiertos de Egipto; el Negev, a Jordania meridional.

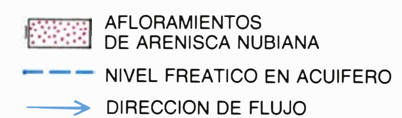
Ciertamente, las semejanzas geológicas, estructurales y estratigráficas entre la península de Sinaí-Negev y las placas africana y arábiga permiten concebir aquella como otra placa en miniatura. El parecido de la península de Sinaí-Negev con sus aledaños atestigua su separación reciente (en términos geológicos) de Asia al este y Africa al oeste. El golfo de Eilat, el valle de fractura de Arava y la hendidura (rift) del mar Muerto hoy separan el Negev de Asia, mientras que el rift del golfo de Suez aleja el Sinaí de Africa. La separación del Sinaí y el Negev de Arabia y Africa, ocurrida en los albores del período Cuaternario, hace unos dos millones de años, constituyó la culminación de movimientos de placas durante el período Terciario.

Los movimientos de cizallamiento y fallas normales que principiaron a fines del Terciario y continuaron en el Cuaternario inferior y medio imprimieron a los valles de fractura sus accidentes morfológicos actuales y provocaron la desviación de los modelos de drenaje desde el mar Mediterráneo hacia los rifts. La fracturación también afectó profundamente al flujo subsuperficial de agua subterránea. Las fallas regionales que recorren los bordes de los valles de rift fracturaron las rocas a lo largo de los planos de falla y desplazaron verticalmente capas impermeables; se abrieron así vías de flujo entre la subsuperficie profunda y la superficie. Todavía asciende agua desde las profundidades hasta la superficie siguiendo tales vías, constituyendo manantiales y oasis.

Pero no todos los oasis del desierto se alimentan de agua profunda subyacente. Por ejemplo, Al-‘Arīsh y otros oasis de las antiguas rutas próximas al Mediterráneo que conectan Egipto con

1. PENINSULA DE SINAI-NEGEV. Comparte rasgos geológicos, estructurales y estratigráficos con Asia y con Africa, de las que se separó hace unos dos millones de años. El parecido entre la península y Africa septentrional, donde existe una vasta cantidad de agua bajo el Sahara, induce a pensar que también hay un acuífero enorme bajo los desiertos de Sinaí-Negev. la ilustración es una composición de imágenes landsat en falso color obtenidas con radiación infrarroja. (Cortesía de Earth Survey Co.)



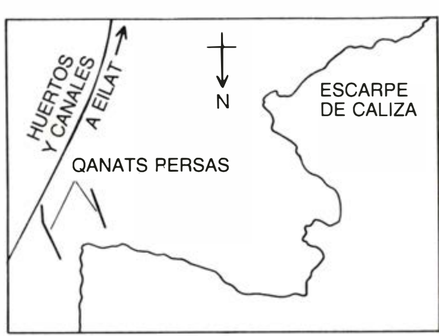


2. MANANTIALES ARTESIANOS Y POZOS distantes entre sí centenares de kilómetros dan fe de la existencia del acuífero. El agua del pozo de Nakhel en el Sinaí central tiene unos 20.000 años de antigüedad y el agua de las fuentes de 'Ayun Musa en el borde occidental del Sinaí y de pozos cercanos al mar Muerto se remonta unos 30.000 años. El agua de los manantiales y pozos presenta una composición química e isotópica notoriamente similar; lo más destacado es el alto contenido en sulfato que les imprime un sabor amargo, conocido ya por Moisés. El perfil a lo largo de la línea *A-A'* se ilustra en la figura 4.

el Creciente Fértil se alimentan de mantos freáticos someros, presentes bajo los médanos. Las escasas lluvias (entre 50 y 100 milímetros anuales) que caen en las dunas se filtran rápidamente en la arena y no se evaporan. El agua se acumula sobre las capas de roca impermeable subyacentes y forma un manto freático somero de pendiente suave hacia el mar. El manto freático queda próximo a la superficie del terreno junto a la costa, de modo que los habitantes y viajeros podían cavar pozos someros para abastecerse de agua.

Esta formación supone que un viajero bien guiado de la antigüedad podía contar con un suministro fiable para su grupo y sus animales de carga a lo largo de la mayor parte del camino septentrional desde Egipto hasta el Creciente Fértil. Debía acarrear sólo el agua suficiente para algunos de los tramos más largos entre oasis. En cambio, cruzar el desierto de Sinaí resulta más difícil, incluso para grupos pequeños, y no digamos para las caravanas, si deben elegir una ruta más meridional. A lo largo de ésta, los recursos hídricos escasean mucho más que en el camino del norte. Sólo se encuentran dos enjambres de fuentes grandes muy distantes. Uno es el conjunto de 'Ein Kudeirat y Qadis (el bíblico Qadesh Barnea), cercano a la frontera israelí, y el otro es el de 'Ayun Musa próximo al golfo de Suez.





3. CADENAS DE POZOS (llamados qanats), visibles en la fotografía aérea de arriba, fueron planeadas por ingenieros persas y excavadas en el valle de rift de Arava hace unos 2000 años para explotar el caudal de agua subterránea del acuífero del Sinaí-Negev. Los qanats son galerías subsuperficiales que drenan el manto freático y llevan el agua a la superficie. Se abrieron pasadizos para la ventilación y para facilitar la remoción de material excavado. Parte de esta grava y del suelo se emplearon en la construcción de montículos anulares alrededor de los pasadizos, revelando así su emplazamiento a quienquiera lo observe desde arriba.

Desde hace mucho se sabe que los manantiales de 'Ayun Musa no pueden mantenerse con las lluvias e inundaciones locales insignificantes. Ya en los años 40, Leo Picard, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, sugirió que la fuente de esos manantiales debía ser un vasto acuífero situado bajo la península de Sinaí-Negev. Formuló la hipótesis de acuerdo con las semejanzas geológicas entre la región y Africa septentrional, donde existe un gran acuífero bajo el desierto del Sahara.

En la década siguiente, Zeev Shiftan, del Servicio Geológico de Israel, observó que de las fuentes de la línea de falla cercana al mar Muerto en el margen oriental del desierto de Negev manaba un caudal continuo de agua. A diferencia de la mayoría de manantiales de Israel, éstos no fluctuaban con la estación. Shiftan sugirió que las fuentes debían constituir un desagüe de un vasto acuífero en la capa de arenisca nubiana subyacente al Negev. Pero nadie se atrevió a calcular el volumen almacenado bajo los desiertos del Sinaí y el Negev debido a la escasez de datos disponibles de aquellas regiones. Los manantiales de 'Ayun Musa y los de la orilla del mar Muerto, que juntos resultaron constituir una persuasiva prueba de la existencia de un gran acuífero, distan entre sí centenares de kilómetros, y por mucho tiempo no se veía claro su fuente común.

A fines de los años 50 un equipo de geofísicos de la Universidad de Heidelberg aportó los primeros datos científicos en favor de la propuesta de Picard. Mediante datación por C^{14}, dedujeron que el agua de 'Ayun Musa tenía unos 30.000 años de antigüedad. Estudios posteriores señalaron que el agua de pozos artesianos de la capa de arenisca nubiana próxima al mar Muerto se remontaba igualmente 30.000 años y que el agua de un pozo petrolífero abandonado abierto en la capa de arenisca nubiana en Nakhel, Sinaí central, tenía 20.000 años. Incidentalmente, geólogos que perforaban pozos profundos de prospección de petróleo en el Sinaí central y cerca de la orilla del mar Muerto encontraron que la capa de arenisca contenía agua salobre a presión artesiana.

Las edades determinadas mediante datación por C^{14} concuerdan con resultados de modelos de flujo hidrológico. Tales modelos determinan el lapso de tiempo requerido para que el agua que se infiltra en la subsuperficie de las áreas de afloramiento fluya hasta oasis del desierto a centenares o incluso miles de kilómetros de distancia. Esas edades también concuerdan con las establecidas para el agua del Sahara. Coinciden con la parte más tardía de la glaciación más reciente, que reinó en el globo entre hace unos 80.000 y unos 15.000 años.

Mis propias investigaciones hidrogeológicas a lo largo del valle de rift de Arava encajan bien en el cuadro de pruebas que se dibuja. Descubrí un notable parecido en la composición química del agua subterránea que fluye a lo largo de las líneas de falla que discurren por el margen occidental del valle, a unos 300 kilómetros de 'Ayun Musa. El parecido se expresa cuantitativamente comparando el contenido en sulfato y la proporción relativa entre sales disueltas en muestras de agua de localidades diferentes. En todas las muestras hallé un alto contenido en yeso ($CaSO_4$) y epsomita ($MgSO_4$).

Otros grupos han encontrado las mismas características en agua de los bordes del valle de rift del mar Muerto y de 'Ayun Musa en el valle de rift de Suez. Esos sulfatos, conocidos por su sabor amargo, explican las adversas reacciones digestivas de habitantes y viajeros, desde el tiempo de Moisés, que bebieron el agua de los manantiales de la línea de falla del valle de rift de Arava y de las fuentes de 'Ayun Musa.

A pesar de que todos los datos apuntaban a la existencia del acuífero, los primeros años 70 encontraron la comunidad de hidrogeólogos israelíes dividida en dos. Un grupo, convencido de la existencia del acuífero, argüía que podía explotarse y cambiar profundamente las expectativas de desarrollo en esas regiones. El otro grupo les contradecía afirmando que los datos eran limitados y dispersos para apoyar la conclusión de que tal acuífero existe.

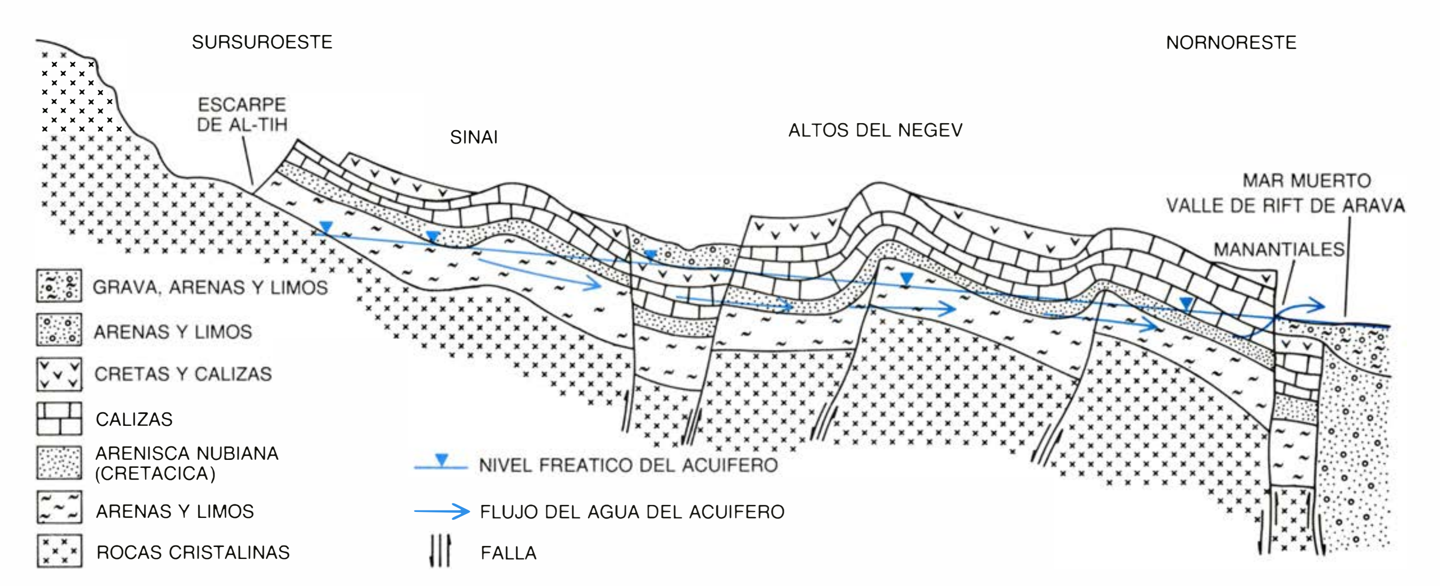
A la luz de ese debate entre hidrogeólogos contemporáneos, reviste interés señalar que los ingenieros hidráulicos de la antigüedad, posiblemente persas o estudiantes de la escuela persa de buscadores de agua, hace unos 2000 años supieron ya del caudal de agua subterránea del Sinaí. Excavaron una cadena de pozos en dirección perpendicular al risco del valle de rift de Arava para explotar el caudal. Teniendo presente que en tal dirección no se extiende ningún río ni conos afluviales, el descubrimiento del agua subterránea por los antiguos ingenieros es realmente impresionante.

Estas cadenas de pozos, llamados qanats, son galerías subsuperficiales que forman un canal bajo el nivel freático y llevan el agua a la superficie. A lo largo de las galerías, que discurren paralelas al gradiente del agua subterránea, se excavaron hoyos para facilitar la entrada de aire y la remoción de material excavado. Estos pozos, rodeado cada uno por un montículo anular de grava y suelo excavados, se ven en fotografías aéreas.

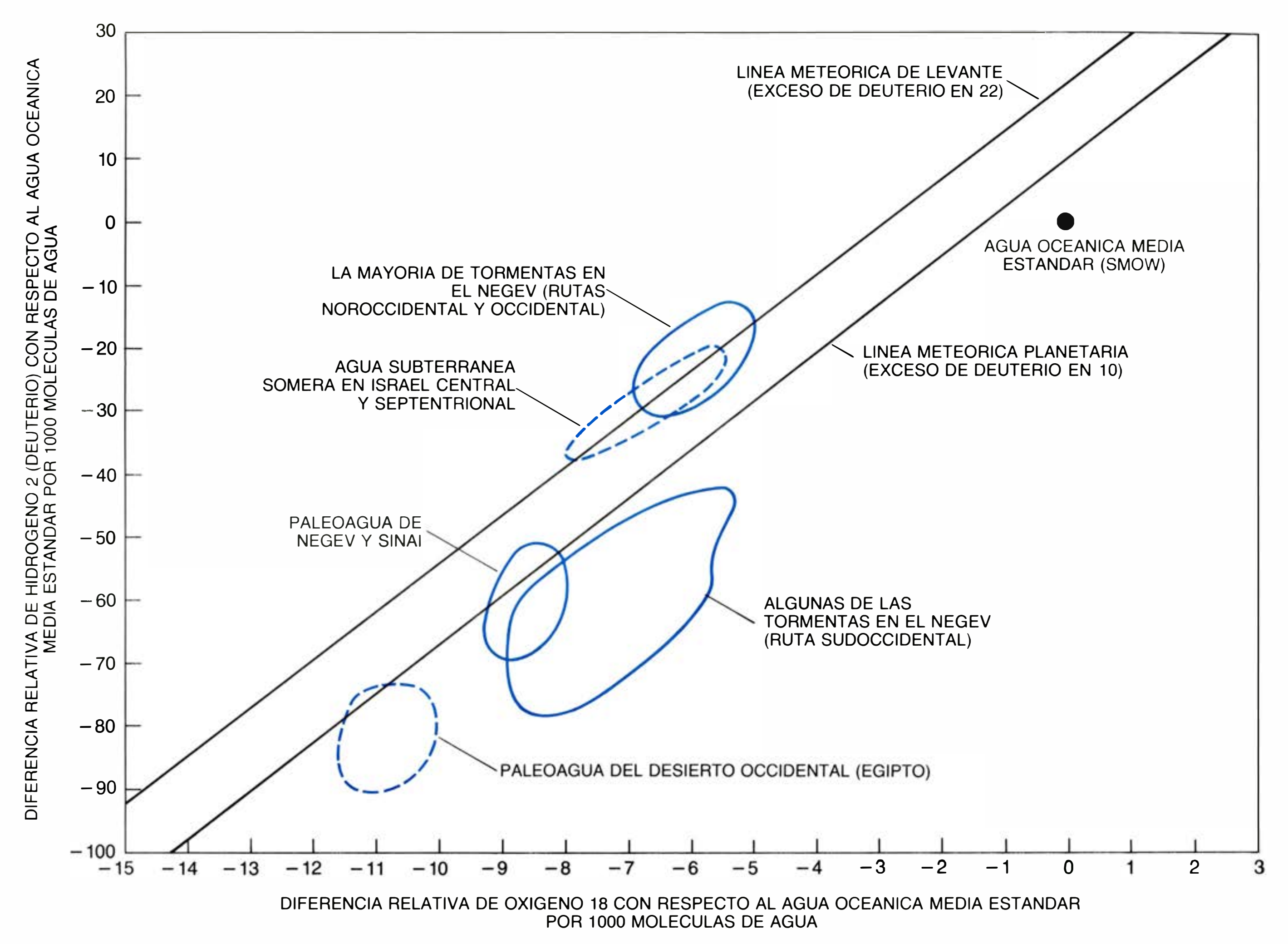
Los hidrogeólogos modernos no resolvieron el debate acerca de la existencia del acuífero hasta la puesta en práctica del método de análisis de isótopos recientemente desarrollado. Este método mide la proporción en una muestra de agua del hidrógeno pesado (hidrógeno 2, o deuterio) y el oxígeno pesado (oxígeno 18). El agua natural está constituida predominantemente por dos átomos de hidrógeno normal (hidrógeno 1) y un átomo de oxígeno normal (oxígeno 16). La proporción relativa entre deuterio y oxígeno 18 en una muestra de agua viene a ser su "huella digital". Muestras de agua de 'Ayun Musa, del pozo de prospección petrolífera abandonado y abierto en la capa de arenisca nubiana en Nakhel, en el Sinaí central, y de los pozos artesianos de la capa de arenisca nubiana cerca del mar Muerto, tienen todas las mismas proporciones relativas de deuterio y oxígeno 18. Además, las proporciones difieren de las que se registran en el agua de las lluvias contemporáneas y agua subterránea del Sinaí e Israel. Los resultados también demuestran que los desagües del acuífero se extienden a lo largo de las líneas de falla regionales de los valles de rift de Suez y el mar Muerto.

Para estudiar la composición isotópica del agua de la península, ideé con mis colegas un aparato especial de muestreo. Nos instó a ello la dificultad del terreno, la escasez de asentamientos, la azarosidad de tormentas y episodios de inundación y la necesidad de evitar la evaporación de las muestras de agua. El muestreador consiste en un embudo cuyo diámetro se diseñó para albergar 200 centílitros de agua, la cantidad necesaria para análisis químicos e isotópicos. Un dispositivo magnético en cada muestreador sella herméticamente el colector cuando está lleno. Las aguas se desvían entonces al colector siguiente en una serie de muestreadores iguales. Instalamos esos muestreadores por todo el desierto en estaciones de observación. Para recoger agua de crecidas que se infiltra por los lechos de grava de ríos del desierto, excavamos trincheras especiales en los lechos fluviales y cubrimos los muestreadores con grava.

Además de contribuir a resolver la cuestión del acuífero, nuestros análisis isotópicos y químicos sugieren de dónde procede el agua de este gran recurso. Estamos en deuda con el trabajo pionero de Joel R. Gat y Willfrid Dansgaard, quienes realizaron su investigación en el Instituto Weizmann de Ciencias. Gat y Dansgaard hallaron que la abundancia relativa de isótopos pesados en el agua de lluvia y subterránea que venía del Mediterráneo difería de la que existía en la de lluvia y subterránea procedente de los océanos. En ge-



4. CORTE GEOLOGICO que muestra el flujo de agua en el acuífero del Sinaí-Negev desde las montañas del Sinaí central hasta los manantiales de la línea de falla cercana al mar Muerto. El agua está almacenada en la arenisca nubiana, una capa que se formó durante el período Cretácico, hace unos 100 millones de años. La presión artesiana eleva el agua hasta la superficie, donde va fluyendo continuamente, cualquiera que sea la estación del año.



5. ANALISIS DE ISOTOPOS PESADOS de agua recogida por colectores de muestras. Dicho examen aportó una explicación sobre la formación del acuífero del Sinaí-Negev. A la proporción relativa de hidrógeno pesado (hidrógeno 2, deuterio) y oxígeno pesado (oxígeno 18) que tiene el agua oceánica se le asigna el valor 0 y dicha agua se llama agua oceánica media estándar (SMOW, "standar mean ocean water"). (La mayor parte del agua natural consta de dos átomos de hidrógeno normal, hidrógeno 1, y un átomo de oxígeno normal, oxígeno 16.) Por causas termodinámicas el aire contiene ocho veces más moléculas de agua que incluyen deuterio que moléculas que comprenden oxígeno 18. Una superposición gráfica entre la proporción relativa de deuterio y de oxígeno 18 en muestras de agua determina una línea con una pendiente de 8. (Las proporciones relativas de isótopos pesados son negativas, porque son menores que las de la SMOW). Condiciones locales de evaporación desplazan esta línea hacia arriba una magnitud llamada "exceso de deuterio". Tanto las lluvias contemporáneas que caen sobre el Negev desde el norte y el noroeste como el agua subterránea somera de la península se inscriben en la línea meteórica de Levante, cuyo exceso de deuterio es 22. La composición isotópica de las lluvias contemporáneas del sudoeste y la del agua del acuífero caen ambas en la línea meteórica planetaria. El exceso de deuterio es 10. Tales resultados concuerdan con el supuesto de que las lluvias que llenaron el acuífero hace 30.000 años siguieron una ruta, desde el Atlántico, hacia el sudoeste sobre el Mediterráneo meridional, Africa septentrional y golfo de Suez.

neral, el agua de lluvia tiene una composición isotópica más liviana que el agua marina, fenómeno de explicación simple: puesto que las moléculas de agua que contienen cualquier combinación de deuterio y oxígeno 18 son más pesadas que las moléculas normales de agua, aquéllas se evaporan con menor facilidad que estas últimas. La abundancia relativa de isótopos pesados en el agua que se evapora de mares u océanos es, por consiguiente, menor que la del agua oceánica ordinaria. (La concentración de isótopos pesados en el agua oceánica se conoce como agua oceánica media estándar.) Como resultado, la abundancia relativa de isótopos pesados en nubes y agua de lluvia también es menor que el agua oceánica media estándar.

El agua de lluvia que llega a la superficie del terreno se evapora de nuevo, lo que provoca una concentración aún mayor de agua pesada. En cambio, cualquier agua pluvial que se filtra inmediatamente en la subsuperficie y se convierte en subterránea se libra de la evaporación; retiene, así, su composición isotópica originaria. En otras palabras, la composición isotópica del agua subterránea generalmente es la misma que la del agua pluvial de la que se formó.

Analizando el agua subterránea y pluvial del Sinaí-Negev, mis colegas y yo hemos reconstruido los modelos del paleotiempo que reinó en la región cuando se llenó el acuífero. En el transcurso de la reconstrucción descubrimos también por qué es amargo el acuífero.

Para seguir la explicación conviene comprender otro aspecto de la técnica del análisis isotópico. Por causas termodinámicas, el aire contiene ocho veces más moléculas dotadas de deuterio que moléculas provistas de oxígeno 18. Las abundancias relativas de estos isótopos pesados se ven afectadas, además, por condiciones locales de evaporación. El efecto de tales condiciones se refleja a través de una cantidad conmensurable llamada exceso de deuterio.

Una red de estaciones de muestreo de agua repartidas por todo el mundo por la Agencia Internacional de Energía Atómica ha establecido que, en promedio, la lluvia del mundo tiene un exceso de deuterio que ronda el 10. En la cuenca mediterránea, en cambio, el exceso de deuterio de la mayoría de llu-

vias contemporáneas ronda el 22. Por consiguiente, los cocientes entre isótopos pesados de las lluvias de países próximos a los océanos caen en una línea, llamada línea meteórica planetaria, mientras que los cocientes entre isótopos pesados de la mayoría de lluvias de países cercanos al Mediterráneo caen en otra línea, la llamada línea meteórica de Levante [*véase la figura 5*].

Tras una tormenta y los acontecimientos de crecida subsiguientes en el Negev, analizaríamos el agua recogida por nuestros colectores en cuanto a su composición química e isotópica se refería. Los análisis aportaron resultados interesantes relativos a la química de lluvias y crecidas. Se descubrió que la cantidad de sales generadas en el aire y arrastradas por las tormentas era mayor que la cantidad exportada por las crecidas. El hallazgo explica por qué los suelos del desierto se vuelven salados. Una comparación entre la trayectoria de una tormenta y la composición isotópica de la lluvia mostró una correlación estadística entre la composición isotópica y la dirección de la que procedía la tormenta.

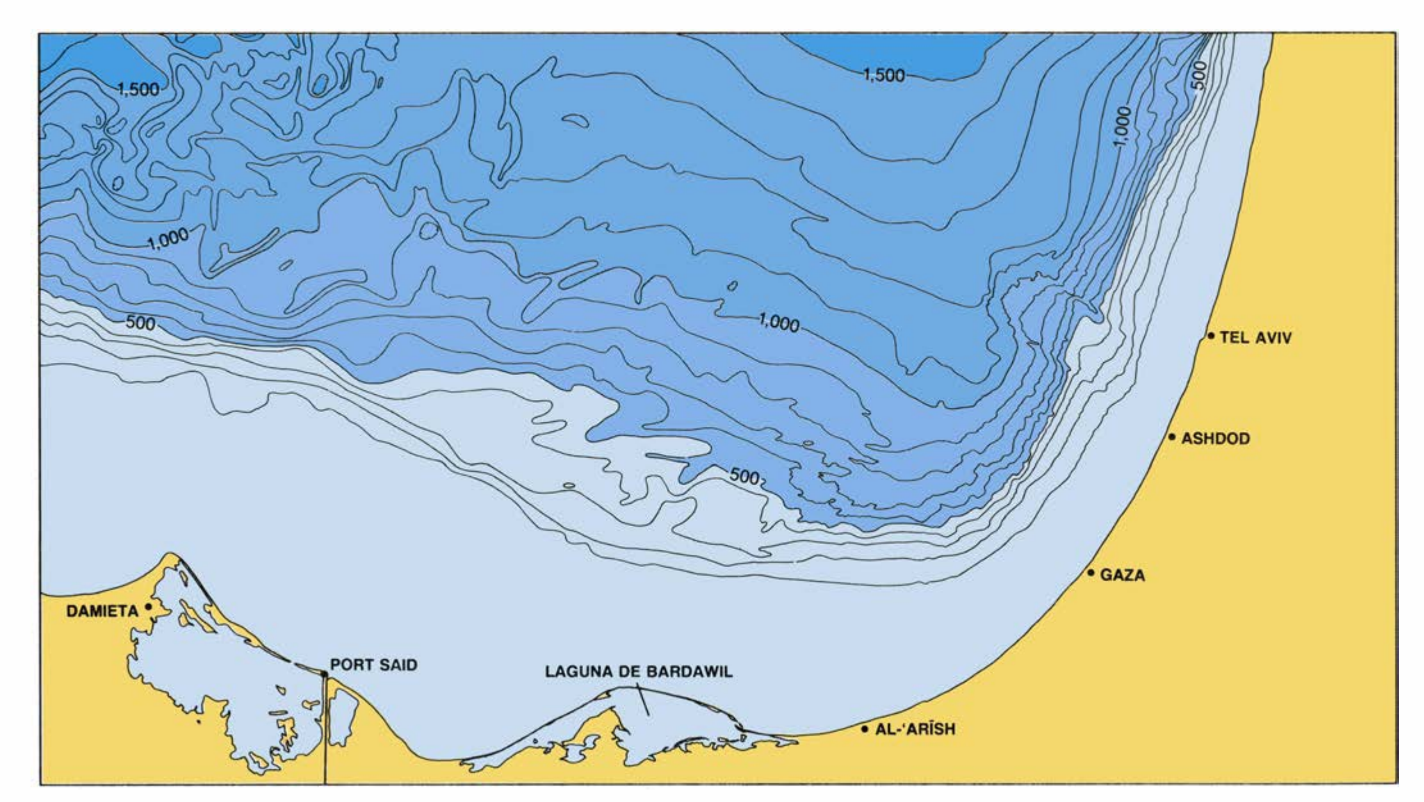
La mayoría de tormentas que caen en el Negev llegan del noroeste y el norte y su composición isotópica es parecida a la de las lluvias de Israel septentrional. Tienen un exceso de deuterio de 22, al igual que el agua subterránea somera del Sinaí e Israel. Pocas tormentas proceden del oeste y sudoeste. Estas son pobres en deuterio y oxígeno 18 y se caracterizan por un décuple exceso de deuterio. La paleoagua del acuífero del Sinaí-Negev tiene también un exceso de deuterio de 10.

La composición isotópica del agua de chubascos procedentes del sur y sudoeste se debe a las condiciones termodinámicas que reinan sobre el Mediterráneo, mar del que aquéllos reciben la mayor parte de su humedad, y a la ruta que siguen sobre los desiertos de Libia y Egipto. La concordancia de composición isotópica entre las tormentas y la paleoagua de la arenisca nubiana brinda la clave sobre la naturaleza de las condiciones climáticas que reinaron en dicha parte del mundo durante el período glacial más reciente (Würm), cuando se llenó el acuífero de la arenisca nubiana.

La glaciación Würm empezó en el Pleistoceno superior, hace unos 80.000 años. Durante ese período, los mares se retiraron mientras los glaciares acopiaban agua. Mapas batimétricos del golfo de Suez y de la costa mediterránea indican que el agua es allí muy somera, con profundidades de apenas unas decenas de metros. Por tanto, puede extraerse la conclusión de que durante el período glacial más reciente el golfo de Suez y la región alta de la plataforma continental de la costa mediterránea a lo largo del Sinaí se secaron, lo que dio lugar a la formación de llanuras salitrosas, marismas y lagunas. Estas salinas consistieron principalmente en sales de sulfato de calcio y magnesio (yeso y epsomita).

Durante este período un área ciclónica fría de alta presión sobre Europa desviaba en dirección sur muchas tempestades procedentes del Atlántico norte que pasaban sobre el Mediterráneo. Impulsadas por el área de alta presión, las tormentas entraban en el continente africano sobre la costa libia y levantaban ante sí enormes nubes de polvo. Cuando las tormentas llegaban a las llanuras salitrosas desecadas, levantaban sal y yeso, que quedaban mezclados con el polvo. Por consiguiente, las lluvias que seguían a las tormentas de polvo se cargaban de barro y provocaban inundaciones que alcanzaban los afloramientos de la arenisca nubiana y rellenaban sus poros con agua salobre.

Un corolario de nuestra reconstrucción de los modelos del paleotiempo



6. AGUA SOMERA A LO LARGO DE LA COSTA MERIDIONAL del Mediterráneo da la clave final de la historia de la formación del acuífero del Sinaí-Negev. (Las profundidades de este mapa batimétrico indican metros bajo el nivel del mar.) Durante la última glaciación, que duró desde hace unos 80.000 años hasta hace unos 15.000 años, el aprisionamiento de agua en glaciares provocó que las regiones someras (a profundidades de hasta 100 metros) del Mediterráneo y del golfo de Suez se secaran, formando llanuras salitrosas a consecuencia de ello. La lluvia del sur barrió las sales de las llanuras. Las avenidas cargadas de barro resultantes se filtraron entonces en los afloramientos de la arenisca nubiana y llenaron el acuífero de agua amarga.

dominante durante el relleno del acuífero es que el clima de la glaciación Würm debió ser drásticamente diferente del clima actual. Gat y el autor llegaron a la conclusión de que el clima reinante en las regiones sur y este del Mediterráneo en la glaciación más reciente fue uno semiárido con lluvias estivales.

Los resultados de las exploraciones arqueológicas confirman esta suposición. El Sahara entero está sembrado de numerosos asentamientos e instrumentos prehistóricos del Paleolítico al Neolítico. Muchas pinturas rupestres de animales de sabana tales como jirafas, elefantes y avestruces, así como sus huesos fosilizados, también atestiguan el bochornoso paleoclima de la región.

Decenas de miles de años después, las tribus israelitas huyeron de la esclavitud en Egipto y viajaron al este. Guiados por Moisés, los judíos cruzaron el valle situado entre el límite septentrional del golfo de Suez y el Mediterráneo. Luego, a salvo de la persecución del ejército egipcio, se desviaron de la ruta costera, donde se apostaban guarniciones egipcias, siguiendo otra vía más meridional. Viajando hacia el sudeste, arribaron a las fuentes de 'Ayun Musa. Acostumbrados al agua dulce del Nilo, el sabor del agua —en especial el amargo del sulfato— no les gustó. Se quejaron del sabor y así dejaron uno de los registros hidroquímicos más antiguos de la historia.

Hoy los hidrogeólogos calculan que el acuífero de la arenisca nubiana bajo el Sinaí y el Negev alberga 200.000 millones de metros cúbicos de agua, de los cuales 70.000 millones yacen bajo el Negev. Asentamientos agrícolas en este último demuestran que el contenido en sal del agua es lo suficientemente bajo como para que ésta resulte apta para regadío. Puesto que el agua, al igual que la hallada bajo el Sahara y Arabia, no puede reponerse, su extracción es análoga a la extracción de petróleo. Para gestionar el recurso se requiere idear un plan a largo plazo.

En la actualidad Israel utiliza 25 millones de metros cúbicos anuales del agua de la arenisca nubiana en fines industriales y agrícolas. Ingenieros e hidrogeólogos israelíes investigan la posibilidad de abrir galerías en las capas de arenisca para bombear 300 millones de metros cúbicos de agua anuales en el siglo XXI. Sueñan en convertir el valle de rift de Arava en una región agrícola densamente poblada. Los estudios preliminares dan resultados prometedores y la investigación prosigue.

Las asclepias y sus visitantes

Los animales que frecuentan la asclepias constituyen una comunidad modelo para el estudio de la interacción entre especies. Llegan en busca de alimento, pero unos cuantos satisfacen, además, las necesidades reproductoras del vegetal

Douglass H. Morse

La asclepias, o algodoncillo, da acogida, anualmente, a un variopinto conjunto de insectos y otros animales. La actividad de la planta alcanza un máximo a principios del verano, cuando sus flores atraen abejas, mariposas, polillas y otros pequeños insectos. Acuden esas especies al néctar azucarado que secretan las flores; varios de los insectos vendrán, de paso, a satisfacer las necesidades de la planta, transportando el polen, a menudo hasta puntos muy alejados. Otros visitantes de las asclepias se alimentan de la propia planta: los afídidos, por ejemplo, chupan la savia; las larvas de la mariposa monarca comen las hojas. Durante el verano, las chinches de la asclepias atacan las semillas. En esa agitada vida animal alternan parásitos y depredadores, cítense avispas y arañas, y carroñeros que reclaman para sí todo lo que los depredadores vayan dejando a su paso.

La actividad que se registra en la asclepias atrae, además, a otro visitante ocasional: el ecólogo, que encuentra en esa comunidad un microcosmos muy adecuado para el estudio de la interacción entre especies. La comunidad es suficientemente rica y variada para recabar su interés, pero no lo bastante compleja para que el número de conexiones entre especies resulte inmanejable. Más aún, la comunidad está bastante aislada: en un momento acotado, los animales que se encuentran en las asclepias efectúan pocas interacciones con otras especies vegetales, y ciertas especies animales pasan toda su vida asociados a esa planta. Por todas esas razones, la asclepias constituyen un modelo útil para los estudios ecológicos de campo.

El nombre inglés de la planta, *milkweed,* literalmente "mala hierba lechera", responde al látex blanco lechoso que exuda al cortarla o romperla. El nombre de la familia a la que pertenece, Asclepiadáceas, deriva de Asclepios, el dios griego de la medicina, y también alude a propiedades atribuidas al látex: en una u otra época, las preparaciones de asclepias se recomendaban para muchos usos medicinales, desde el tratamiento de las enfermedades del corazón hasta la contracepción. Fueran o no eficaces esas aplicaciones, lo cierto es que algunas poseen potentes alcaloides (sustancias vegetales activas en animales superiores).

He ceñido mi investigación a una especie común, *Asclepias syriaca,* que crece por gran parte del este y centro de Norteamérica. Colonizadora de lugares abiertos, se la ve en campos y pastizales, en ribazos e incluso en zonas urbanas abandonadas. Como otras invasoras de zonas aclaradas, el algodoncillo tiende a crecer rápidamente, si bien tolera mal la sombra. En pocos años se desarrollan densas colonias de docenas, y centenares incluso, de individuos. La colonia surge por el crecimiento subterráneo de rizomas o brotes radicales, no por reproducción sexual, de modo que todas las plantas de una colonia de ese tipo son genéticamente idénticas: constituyen un clon.

Un ejemplar típico mide unos 90 centímetros de altura; tiene hojas ovales, dispuestas por pares (opuestas) sobre un tallo erecto. Las plantas florecen en junio y julio; las flores fecundadas se transforman en grandes frutos cónicos. En otoño se abren los frutos, liberándose a centenares las semillas, unidas a penachos sedosos, que dispersa el viento.

Determinada interacción entre la asclepias y cierto insecto se ha convertido en un ejemplo clásico de la bibliografía ecológica. Las larvas de la mariposa monarca, *Danaus plexippus,* se alimentan del follaje de la asclepias y almacenan los alcaloides de la planta en sus tejidos, lo que hace incomestible a la mariposa adulta; pronto aprenden las aves a evitarlas. Otras mariposas, que mimetizan la apariencia de la mariposa real, se benefician de sus defensas químicas, aunque ellas no se alimenten de la asclepias y no posean el nocivo alcaloide.

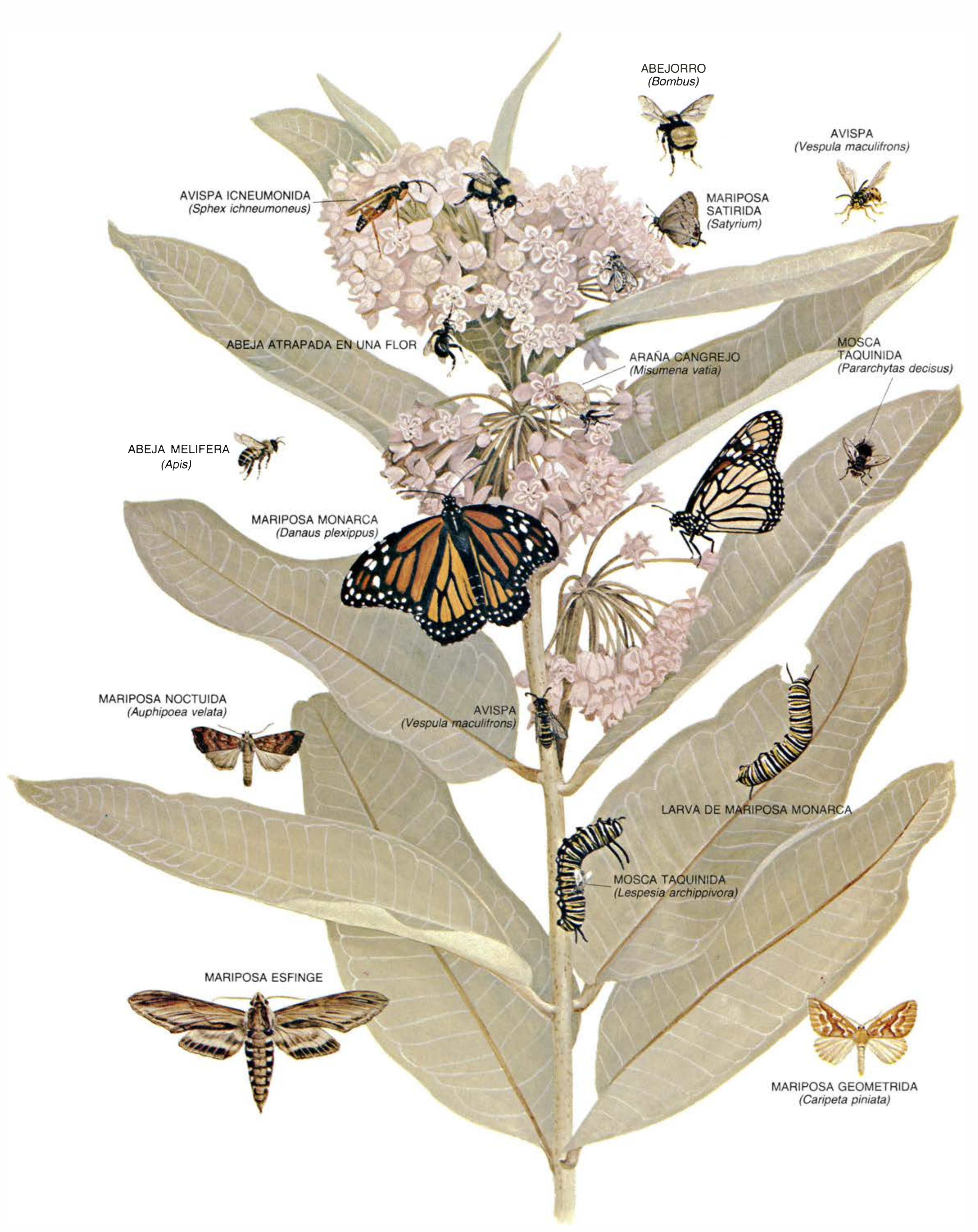
La biología evolutiva de la mariposa monarca y sus imitadoras está repleta de complejidades fascinantes, pero su relación con la asclepias es la de un simple herbívoro. Otros insectos muestran interacciones más complejas con la planta. Las especies que realizan la polinización constituyen algunos de los casos más interesantes.

En la mayoría de las plantas con flores el polen se produce en anteras pediculadas; los óvulos se sitúan en la base de un pistilo alargado. El polen se libera en granos sueltos o en grupitos de varios; cuando un grano alcanza la superficie pegajosa del estigma, en la terminación del pistilo, se desarrolla un tubo polínico que crece hacia abajo, hasta los óvulos, donde se produce la fecundación. La estructura de la flor de la asclepias se distingue por varios aspectos. El pistilo es muy corto, en tanto que el estigma, muy grande, presenta una profunda hendidura. Es más, el polen no se libera en granos sueltos, sino que está agrupado en estructuras, los polinios, donde una capa cérea reúne muchos granos (suficientes para fecundar todos los óvulos de un pistilo).

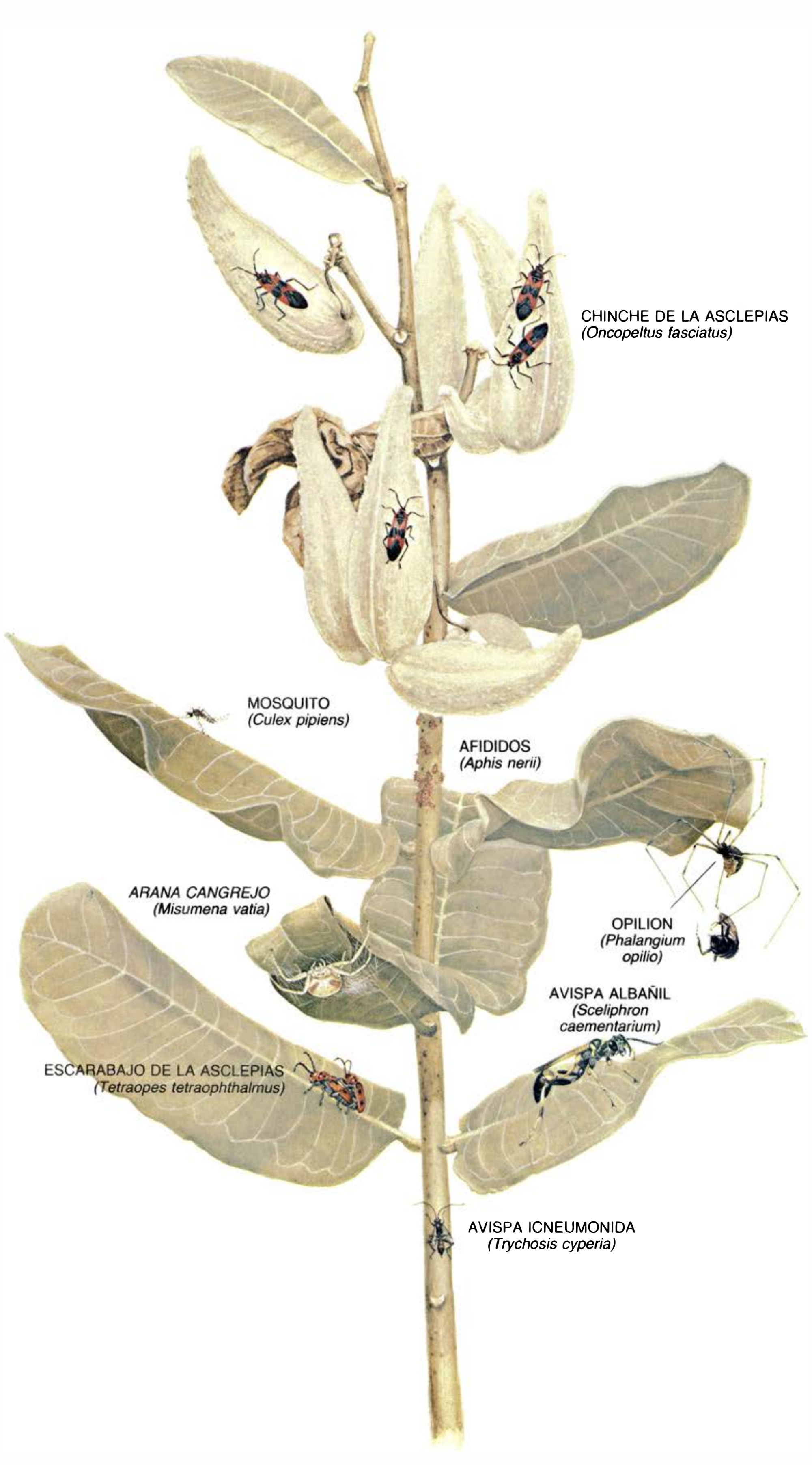
La flor del algodoncillo consta de cinco partes; en cada una hay un estigma y un par de polinios, alojados en sacos a cada lado del estigma. Los polinios de cada par están conectados por bandas delgadas, denominadas brazos del traslator, a un sujetador adherente, el corpúsculo, o retináculo, ubicado en la parte superior de la hendidura estigmática. La unidad de polinización (dos polinios, dos brazos del traslator y un retináculo) presenta la forma general



1. APERTURA DEL FRUTO de una asclepias. Se liberan así entre 100 y 200 semillas, dotadas de penachos sedosos. Si bien el agente que dispersa las semillas es el viento, en una fase anterior del ciclo reproductor la planta depende del servicio de los animales: la polinización cruzada, esencial para el éxito reproductor, sólo pueden efectuarla abejas, abejorros, mariposas nocturnas y otros grandes insectos. La asclepias es una planta pionera, que coloniza terrenos despejados. Tanto las semillas como el polen deben cubrir grandes distancias, pues los lugares idóneos para la planta suelen estar muy alejados.



2. VISITANTES VERANIEGOS de la asclepias. Se cuentan entre ellos gran variedad de herbívoros, depredadores y parásitos, si bien los comedores de néctar, que se alimentan de sus flores, son los que más influyen en la prosperidad de la planta. Las abejas y otros ápidos, atraídos por el néctar, son sus principales polinizadoras; también colaboran algunas mariposas nocturnas (incluidas ciertas especies de noctuidos y geométridos). Otros insectos se alimentan de las flores, pero raramente transportan polen. Entre los herbívoros destaca la mariposa monarca, cuya larva vive del follaje y regresa en fase adulta para consumir néctar. Las arañas cangrejo capturan a los insectos que visitan la planta. Las moscas taquínidas parasitan a otros animales.



3. COMUNIDAD DE ASCLEPIAS EN OTOÑO. Su composición es distinta. Tras la partida de los buscadores de néctar, los afídidos, que chupan la savia, infestan la planta de forma intermitente. Las chinches de la asclepias chupan el contenido de las semillas en desarrollo; los escarabajos se comen las hojas. La araña cangrejo continúa con sus capturas, y algunos carroñeros, como los opiliones, recogen los restos de lo que han matado los predadores. Las avispas albañiles y las de la familia icneumónidos son parásitos.

de una espoleta; se denomina polinario.

En la superficie expuesta del corpúsculo hay un surco, que se estrecha de abajo arriba. Cuando un insecto camina sobre la flor, sus patas o piezas bucales pueden quedar trabadas en el surco. Al forcejear, arranca los polinios de sus sacos, o bursículas, y se lleva el polinario. Pocos minutos después, un giro de los brazos del traslator rota los polinios unos 90 grados. Antes de la rotación, los polinios se disponen como la planta de los pies con los dedos hacia delante; después de la rotación, los dedos apuntan hacia fuera.

Si un insecto cargado con un polinario visita otra flor de asclepias, uno de los polinios puede trabarse en el extremo inferior, ensanchado, de la hendidura estigmática. Al moverse el insecto, el polinio penetra más aún en la hendidura, hasta que, en el extremo superior, tropieza contra el retináculo del polinario "residente" (suponiendo que esa estructura no se haya dispersado todavía). Suele, en ese momento, romperse el brazo del traslator, dejando el polinio en la cámara estigmática. Los granos de polen contenidos en el polinio desarrollan entonces tubos polínicos que crecen hacia los óvulos instalados en la base de la flor. Lo más probable es que el insecto se haya llevado ya el polinario residente. En muchos casos, el retináculo de un polinario se adhiere al brazo roto del traslator de otro, y llegan a formarse así largas cadenas de polinarios, a modo de apéndices de los insectos.

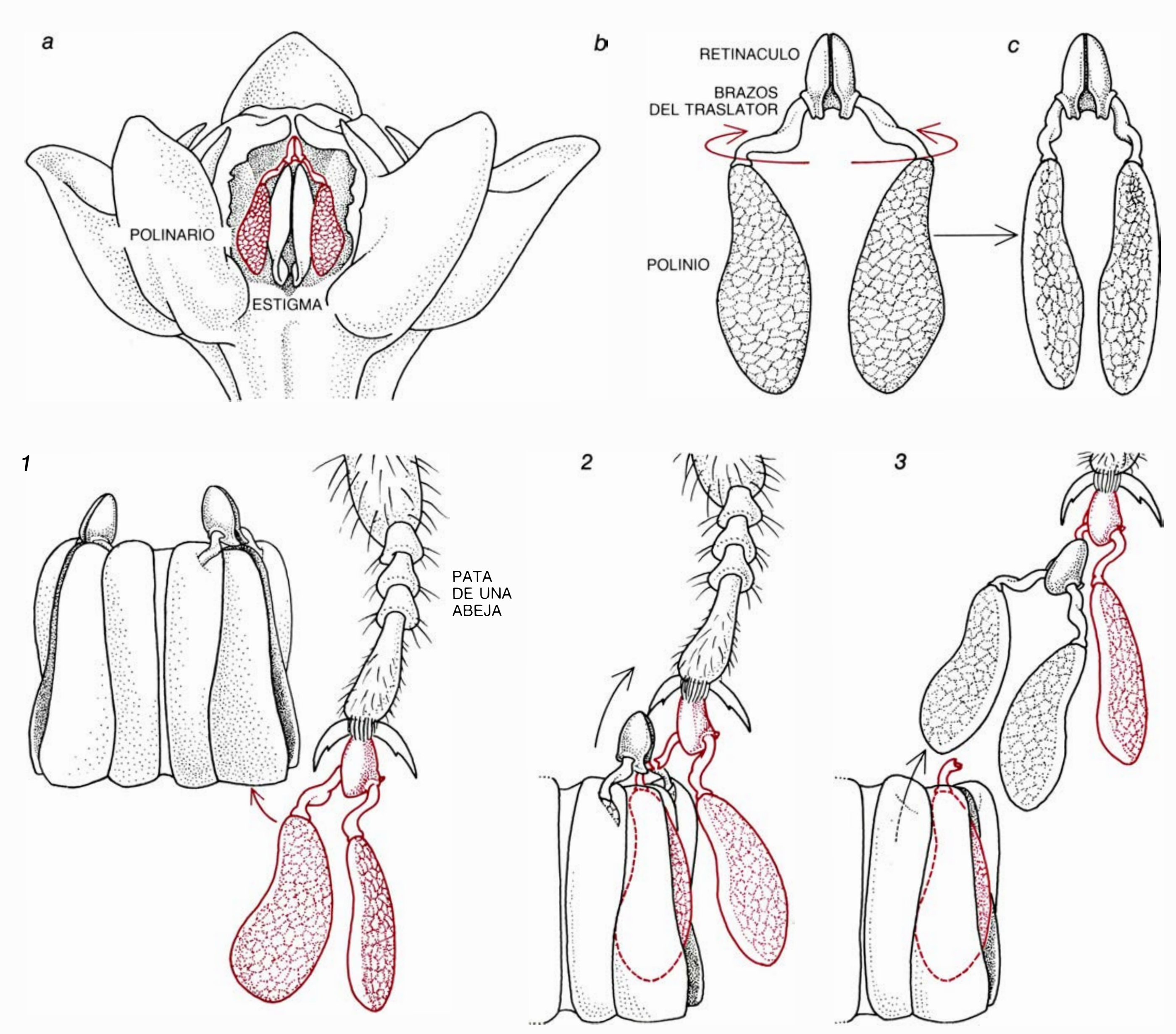
Al analizar la estrategia reproductora de la asclepias debe tenerse en cuenta que la planta presenta fecundación cruzada obligada, o casi obligada. Muy raramente son fértiles las flores autopolinizadas. Susan R. Kephart, de la Universidad Willamette, y otros han demostrado que algunas poblaciones de asclepias presentan una capacidad muy menguada para la autofecundación, pero incluso en esos casos los frutos formados por autopolinización suelen abortar al principio de su desarrollo. La exigencia de polinización cruzada reviste particular importancia en razón de la tendencia de la planta a crecer en clones de gran extensión. Los insectos podrían alimentarse de un único clon, y sólo llevar a cabo autopolinizaciones.

Ciertos rasgos del mecanismo de polinización del algodoncillo favorecen la polinización cruzada. Por ejemplo, la rotación de los polinios pocos minutos después de su extracción de los sacos

les confiere una orientación en la cual encajan fácilmente en una hendidura estigmática. Antes de la rotación son mucho más escasas las posibilidades de que se inserten. El retraso quizá dé tiempo al insecto para moverse de un clon a otro. También la forma de romperse el brazo del traslator, al dejar el polinio en el estigma, pudiera favorecer la fecundación cruzada, aunque el análisis de este factor resulta complicado. Es más probable que se rompa el brazo del traslator si el polinario residente no ha sido ya diseminado. Por ello, al menos durante las primeras fases de la floración, las flores que conservan su polen son las que ofrecen mayor probabilidad de quedar fecundadas. Quizá sean las que intercepten el polen de otros clones con más frecuencia.

Las flores de la asclepias tienen dos ovarios. En principio, pues, cada flor puede producir dos frutos; en la mayoría de los casos, sin embargo, sólo se desarrollará hasta la madurez uno de ellos. En muchas zonas, el factor que limita el número de frutos probablemente sea el aporte de nutrientes del suelo, como han demostrado Mary F. Willson y sus colegas, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. En esas condiciones podría actuar una forma de selección sexual. En las aves y mamíferos, la selección sexual es un proceso sencillo: por regla general, la hembra escoge a su pareja de acuerdo con algún rasgo externo, como el brillo del plumaje, que tiende a acentuarse de este modo en la población. El proceso cambia algo en el algodoncillo. Una flor no puede seleccionar qué polinio recibe, pero si hay muchos polinios y sólo una flor puede convertirse en fruto maduro, cabe ahí ejercer cierto control.

Susan S. Bookman, de la Universidad estatal de Washington, ha someti-



4. POLINIZACION DE LA ASCLEPIAS. Depende de los servicios de insectos. La flor de asclepias (*a*) presenta una anatomía poco usual, mostrada aquí en sección. El polen está encerrado en una estructura cérea denominada polinio; el estigma, encargado de recibir el polen, tiene forma de hendidura. Por cada estigma hay un par de polinios, conectados, a través de unas bandas delgadas, denominadas brazos del traslator, a un retináculo: un sujetador adhesivo con un surco central que se estrecha de abajo arriba. El conjunto de polinios, brazo del traslator y retináculo se denomina polinario (*b*). Tras la separación del polinario de la flor, una rotación de los brazos del traslator gira 90 grados los polinios (*c*), alterando su orientación para que encajen en el estigma de otra flor. El polinio penetra por el extremo inferior del estigma (*1*), hasta que tropieza contra el retináculo del polinario residente (*2*). Se rompe el brazo del traslator, dejando el polinio implantado en el estigma. El polinario de la propia flor puede unirse al brazo roto del traslator y salir arrastrado (*3*).

do a prueba esa hipótesis en experimentos con la vistosa *Asclepias speciosa,* especie muy emparentada con la común. Polinizando a mano flores con polinios de clones distintos ha demostrado que no todos se aceptan por igual como progenitores masculinos. Sin duda la asclepias selecciona los "mejores" padres de entre los disponibles, aunque se ignora qué criterio dicta la aceptación del progenitor.

Mis propios estudios con *A. syriaca,* que crecía en una región costera de Maine, llevan a una conclusión diferente. En esa zona parece que la producción de frutos no está limitada por los recursos nutritivos, sino por la disponibilidad de polen. Con polinización manual, el número de frutos que alcanzan la madurez se incrementa enormemente. Dada la escasez de polen genéticamente adecuado, parece poco probable que a la selección sexual le corresponda un papel importante en la reproducción de esos clones. El estudio de la polinización de la asclepias constituye, por tanto, una oportunidad para sopesar la importancia de la selección sexual bajo diferentes condiciones naturales.



5. MARIPOSA MONARCA, *Danaus plexippus*; es una de las especies más estrechamente asociadas a la asclepias. La litografía nos muestra sus larvas alimentándose de las hojas. Los alcaloides que contienen algunas asclepias hacen incomestibles las mariposas adultas, lo que ofrece protección frente a los depredadores tanto a la mariposa monarca como a otras especies de mariposas que imitan su aspecto.

Puesto que el algodoncillo se presenta sobre todo en zonas con sucesión vegetal incipiente, como claros temporales del bosque, los clones más próximos disponibles para la polinización cruzada pueden quedar a muchos metros, o incluso kilómetros, de distancia. Esa distribución dispersa obliga a asegurarse los servicios de grandes insectos capaces de cubrir extensos recorridos. Para atraerlos hay que ofrecerles recompensas interesantes, que en la asclepias se materializan en una abundante secreción de néctar.

En mi área de estudio, los habituales visitantes diurnos de gran tamaño son abejas y otros himenópteros, principalmente abejorros. Desde el punto de vista anatónimo, resultan adecuados para realizar la polinización y, de hecho, se ha comprobado que llevan polinarios en sus patas y piezas bucales. Ahora bien, la mayoría de las abejas son obreras y deben volar constantemente de las flores a la colmena. Cabe esperar, por tanto, que cada una visite relativamente pocos clones, y que transporte el polen a distancias más cortas que un insecto sin esa obligación regular de volver a una base fija. Otros buscadores de alimento, así mariposas diurnas y nocturnas y zánganos, pueden recorrer, libremente, grandes extensiones.

Las mariposas, que visitan asiduamente al aldodoncillo, no están obligadas a realizar vuelos radiales desde una base central. La mariposa monarca, en particular, visita los clones de mi área de estudio en gran número; parecería un buen candidato para diseminar los polinios a gran distancia. Pero las observaciones indican que las mariposas no desempeñan un papel importante en la polinización de la asclepias común. Los abejorros las sobrepasan generalmente en una proporción de 10 o 20 a una; las abejas transportan polinios con una frecuencia cuatro veces mayor. Más aún, se ha demostrado que los dos grupos de insectos se mueven entre clones de algodoncillo con una frecuencia similar. En el caso de la mariposa monarca, los datos no admiten duda: en 150 capturas de 75 individuos marcados no he encontrado un solo polinio de la asclepias común.

Así, a pesar de estar ligadas a una colmena, las abejas y abejorros parecen ser los más importantes polinizadores diurnos. En mi área de estudio, dos especies de abejorros, *Bombus terricola* y *B. vagans,* serían los responsables del 75 o 90 por ciento de la polinización diurna. La historia, sin embargo, es más compleja. Por la noche visitan la asclepias gran número de mariposas nocturnas; algunas transportan polinios en sus patas y piezas bucales. La mariposa parda, de la familia noctuidos, que alcanza el tamaño aproximado de un pequeño abejorro, es el visitante nocturno más asiduo. Para medir la

contribución de los polinizadores diurnos y nocturnos llevé a cabo una serie de experimentos. Cubrí grupos de tallos en floración con redes de nylon para evitar los insectos voladores, bien durante el día o bien durante la noche; conté luego los frutos producidos en cada grupo de plantas. Los resultados fueron coherentes de clon a clon y de año en año: la mayoría de las plantas se polinizaban durante el día, pero no todas. La contribución de las mariposas nocturnas variaba del cinco al 25 por ciento.

A la vista de esos resultados, resulta sorprendente que las asclepias secreten mucho más néctar por la noche que durante el día. ¿Cómo explicar esa desviación, que parece contraria al propio interés de la planta? Según una hipótesis el néctar no se produciría cuando se necesita, sino cuando el coste para la planta, en términos de pérdida de agua, es menor. La idea sería plausible si el néctar tendiera a acumularse por la noche, pero no ocurre así. La secreción nocturna la explotan mariposas nocturnas y demás insectos voladores; poco queda por la mañana para atraer a los polinizadores diurnos.

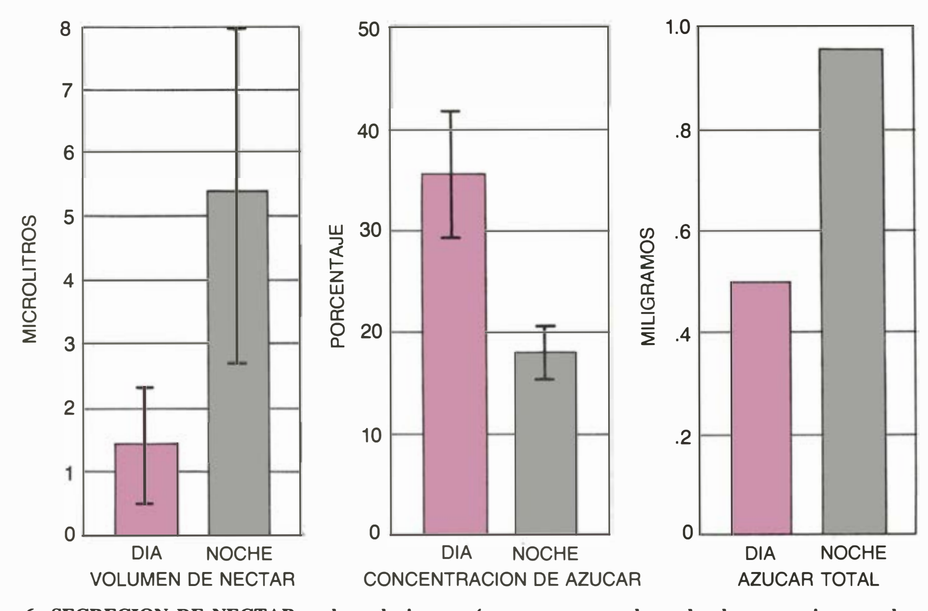
El algodoncillo presenta algunos caracteres distintivos, que se asocian generalmente con plantas polinizadas por la noche. Resulta particularmente olorosa de noche, al menos a los sentidos humanos, y sus flores blancas deben ayudar a identificarla. Las mariposas nocturnas, según se sabe, responden a minúsculas cantidades de olor femenino, si bien podrían igualmente orientarse hacia otras fragancias. N. B. M. Brantjes, de la Universidad de Nimega, ha demostrado que las mariposas nocturnas de las familias de los esfíngidos y los noctuidos localizan el punto de origen de un aroma floral con precisión de pocos metros; a esa distancia, las flores de la asclepias podrían desempeñar la función de señales ópticas, aún en la oscuridad.

La simultánea presencia de reclamo para insectos diurnos y nocturnos sugiere que quizá la asclepias evolucionó en condiciones de escasez periódica de polinizadores. Resultaría entonces ventajoso conseguir explotar cualquier población. Si su principal hábitat original fueron los claros de bosque dispersos, los insectos que se trasladan rutinariamente a través del bosque constituirían piezas esenciales de la polinización cruzada. Las mariposas nocturnas son candidatos probables para desempeñar ese papel. He comenzado a someter a comprobación tal hipótesis de dos formas: controlando regularmente la carga de polinios de las mariposas nocturnas capturadas en el bosque y marcando las mariposas nocturnas encontradas en los diferentes clones y siguiendo su posterior dispersión. Los resultados provisionales nos muestran que varias especies de mariposas nocturnas portadoras de polinios se mueven ampliamente por el bosque, hasta cientos de metros del clon de asclepias más cercano, y que son pocas las mariposas nocturnas que permanecen en un único clon durante mucho tiempo. Queda por demostrar si los movimientos de las mariposas nocturnas son lo suficientemente rápidos para transportar polen viable entre clones muy alejados.

No se conoce con precisión cuánto dura la vida del polen de la asclepias. En experimentos de polinización manual he comprobado que los polinios obtenidos de flores de tres días manteníanse viables, e incluso los polinios de flores de cinco días producían frutos, a veces, si se insertaban en los estigmas de flores recién abiertas. Pero la cuestión estriba en saber si el polen que se ha separado de la flor y va transportado en las patas de un insecto retiene su viabilidad durante un período tan prolongado. La cubierta cérea del polinio quizás aumente su longevidad. He comprobado que los polinios transportados por insectos hasta tres días pueden producir frutos, pero el tema precisa de estudios más extensos. (Hace un siglo, Charles Robertson, naturalista de Illinois, informó de que los polinios de *Asclepias sullivantii* se mantenían viables dos semanas después de haberlos separado de sus flores.)

Desde el punto de vista del polinizador, alimentarse de las flores del algodoncillo puede resultar algo arriesgado. Sólo los grandes insectos poseen fuerza suficiente para arrastrar los polinarios; los más pequeños a veces se atascan en las hendiduras del retináculo y mueren en las flores. Los insectos atrapados suelen ser polillas y moscas de 15 a 50 miligramos de peso (una mosca doméstica pesa alrededor de 20 miligramos), pero también caen en la trampa pequeños abejorros y abejas comunes, de hasta 75 o 100 miligramos. Los insectos mayores logran liberarse por sí mismos, pero a veces pierden las mandíbulas, e incluso algún artejo.

Además de los polinizadores reales y potenciales, muchos otros insectos se alimentan de las flores de las asclepias sin polinizarlas. Entre los insectos voladores, abundan polillas, moscas y mosquitos, con pesos de 10 miligramos o menos. Si bien llevan sólo una pequeña porción del néctar producido, éste significa una fuente de nutrición importante para ellos. Los principales parásitos del néctar no son, sin embargo, insectos voladores, sino las hormigas. Robert S. Fritz, del Vassar College, y el autor han demostrado que no llega a



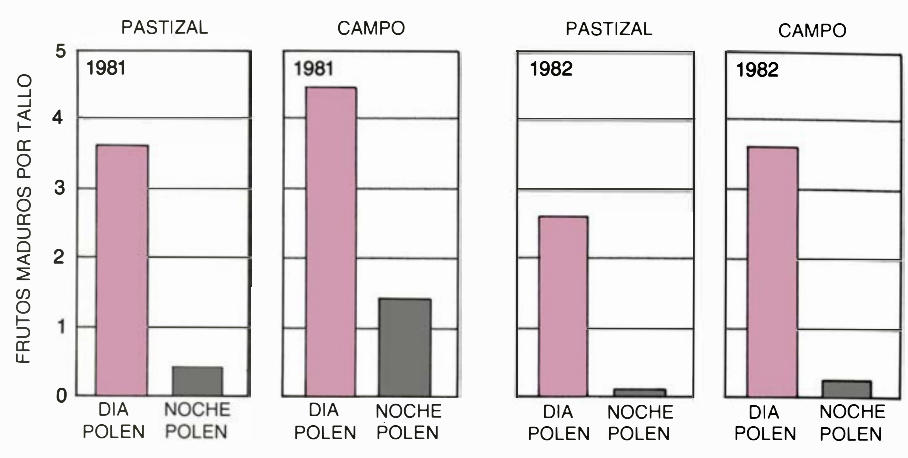
6. SECRECION DE NECTAR en la asclepias común; es mayor por la noche, lo que sugiere que los insectos nocturnos quizá desempeñen cierto papel en la polinización. El volumen de néctar resulta ser casi cinco veces superior por la noche y, si bien la concentración de azúcar en el néctar es mayor durante el día, los insectos que se alimentan de noche disponen de doble cantiadad de ella. Las mediciones las efectuaron Robert S. Fritz, del Vassar College, y el autor en un clon de asclepias que crecía en un prado.

acumularse néctar en las flores de la asclepias visitadas regularmente por las hormigas *Lasius neoniger* y *Tapinoma sessile,* ni siquiera en ausencia de visitantes voladores. Las hormigas raramente transportan polinarios; en cualquier caso, su área de acción es tan limitado que no podrían contribuir a la polinización cruzada. Fritz y el autor han constatado que las hormigas disminuyen de forma significativa la producción de frutos de la asclepias. Al agotar el néctar de las flores, probablemente reduzcan el número de visitas de los insectos polinizadores.

También frecuentan las asclepias animales que no acuden por la propia planta, sino en busca de los insectos chupadores de néctar. Los depredadores más comunes, como la araña cangrejo *Misumena vatia,* cazan emboscándose entre las flores. Sobre la asclepias crecen rápidamente muchas arañas cangrejo, explotando el intenso tráfico de insectos. Las hembras adultas con más éxito decuplican su masa en tan sólo dos semanas, alcanzando un peso de hasta 400 miligramos (el tamaño de una reina de abejorro). Casi los dos tercios de este prodigioso aumento de peso van destinados a producir una sola puesta de huevos. La araña dobla hacia abajo el extremo de una hoja de asclepias y deposita sus huevos, protegidos por un saco, sobre el envés de la hoja. Asegura luego suavemente los bordes de la hoja con seda y, en la mayoría de los casos, vigila la puesta hasta que eclosionan los huevos. Sin embargo, el éxito de la araña no siempre está asegurado.

Las presas abundan sólo cuando la planta está en floración, porLas presas abundan sólo cuando la planta está en floración, por lo general menos de tres semanas; el arácnido debe, pues, seleccionar un buen lugar y explotarlo rápidamente, de lo contrario perderá su oportunidad. Como cabe esperar, las arañas que cazan en las inflorescencias mayores crecen más y ponen mayor número de huevos; alrededor del 20 por ciento de las arañas cangrejo que viven en las asclepias no alcanzan, según parece, el tamaño mínimo necesario para hacer la puesta.

Dado que la depredación de la araña se hace a expensas de los polinizadores, en principio debería disminuir el éxito reproductor de la planta. Sin embargo, las arañas consumen no más del uno o dos por ciento de los insectos visitantes, por lo que no es probable que afecten de manera importante al bienestar de las especies que le sirven de presas ni al



7. POLINIZACION DIURNA Y NOCTURNA. Se midió cubriendo las plantas con una malla para impedir la llegada de insectos voladores durante el día o por la noche. Aunque los insectos nocturnos visitaron las plantas y consumieron la mayor parte del néctar producido de noche, fueron polinizadores poco eficaces, responsables sólo del cinco al 25 por ciento de los frutos maduros que se produjeron en el lugar.

de la asclepias. No he logrado demostrar que las abejas y otros ápidos respondan a la presencia de las arañas: no manifiestan tendencia a evitar las plantas que tienen arañas de caza.

La propia araña cangrejo es vulnerable a parásitos y depredadores, lo que añade una dimensión más a la fauna de la comunidad de la asclepias. Del 10 al 15 por ciento de las puestas de la araña cangrejo son parasitadas por moscas y pequeñas avispas de la familia icneumónidos, en mi área de estudio. La depredación de arañas adultas, sin embargo, parece un hecho menos inhabitual, a pesar de que las avispas cazadoras de arañas de la familia pompílidos visitan ocasionalmente las flores de las asclepias para alimentarse del néctar. Los pompílidos capturan arañas para alimentar a sus crías; paralizan las arañas con su aguijón, las ponen en un nido y hacen la puesta, y así, cuando eclosionan los huevos, las crías de avispa se alimentan de la araña. En ocho años de observación en la costa de Maine sólo he visto una araña cangrejo capturada por un pompílido, aunque en otras zonas aquella constituye una de las presas principales de los pompílidos y de los albañiles, otras avispas de la familia de los esfécidos.

La araña cangrejo digiere sus presas externamente: inyecta su saliva, que contiene enzimas, y luego chupa los tejidos licuados del insecto. El exoesqueleto vacío se desecha, pero rara vez se desperdicia. Si cae al suelo, las hormigas u otros carroñeros, como los segadores u opiliones (*Phalangium opilio*), pronto se hacen con ellos. Por la noche, los segadores van en busca de los cadáveres que quedan en la axila de las hojas; los he visto tratando de arrebatar sus presas a las arañas. Por otra parte, los segadores se alimentan de forma regular del néctar de las flores, y en ellas capturan presas pequeñas, incluso jóvenes arañas cangrejo. Figuran, por tanto, en distintos niveles en la red alimentaria.

Con la marcha de los buscadores de néctar, al terminar la floración, decrece la actividad en la asclepias. Los principales insectos que la ocupan durante el resto del verano son larvas de mariposa monarca, afídidos, en plagas intermitentes, escarabajos de la asclepias *(Tetraopes tetraophthalmus)* y chinches de la asclepias *(Oncopeltus fasciatus)*. Los frutos se desarrollan rápidamente; al cabo de un mes alcanzan su longitud máxima, de 8 a 12 centímetros. Sin embargo, también están sujetos a depredación. La larva de la mariposa monarca come a veces frutos enteros; las chinches de la asclepias que chupan el contenido de las semillas inmaduras causan un daño mayor aún en muchas zonas.

Los frutos supervivientes se abren en octubre o a principios de noviembre, liberando cada uno de 100 a 200 semillas. A pesar de sus paracaídas sedosos, la mayoría de las semillas no llegan muy lejos. Los experimentos de dispersión realizados en compañía de mi colega Johanna M. Schmitt y de mis alumnos de biología de campo de la Universidad de Brown han demostrado que sólo el uno o dos por ciento de las semillas se lo lleva el viento más allá del terreno de dos hectáreas donde crecen las plantas.

Las semillas de algunos clones, e incluso las semillas de diferentes frutos del mismo clon, llegan más lejos que otras. Esa diferente dispersión refleja

variaciones en el tamaño del penacho que les sirve de paracaídas y en el peso de la semilla. Naturalmente, se aleja más un penacho grande que porte una semilla pequeña; por otro lado, las pequeñas tienen menos probabilidades de germinar y, si lo logran, la plántula crece más despacio y tiene un porcentaje de supervivencia menor. Existe, pues, un equilibrio entre el tamaño de la semilla y el radio de dispersión. La variación observada bien pudiera responder a causas genéticas, en cuyo caso la selección natural tendería a perpetuar aquellas combinaciones de tamaño de semilla y penacho que resultaran más adecuadas para adaptarse a la distribución de los lugares colonizables de un área determinada.

Las asclepias dependen, para su éxito, de la colonización rápida de zonas despejadas. Los lugares que se abren a la invasión a raíz de fenómenos naturales, como caída de árboles o inundaciones, suelen conservarse sólo un año o dos; también son transitorias las alteraciones que provoca el hombre, por ejemplo rodaduras de tractores en pastizales y campos. Tras establecerse, los clones inician un crecimiento vigoroso, si bien las plantas no suelen florecer hasta tres o más años después. La floración es, en general, lo suficientemente vistosa para atraer a muchos insectos, lo que aumenta las posibilidades de polinización. En los años sucesivos irá multiplicándose el número de tallos floridos.

En la naturaleza suele estar limitado el crecimiento de un clon de algodoncillo. Las zonas despejadas de bosque raramente se mantienen sin sombra durante mucho tiempo; la asclepias debe dejar paso a la sucesión normal de plantas más duraderas. Bajo esas condiciones, no es muy probable que los clones alcancen grandes proporciones. De hecho, pocos clones crecen lo suficiente para reclamar toda la atención de los grandes insectos de las proximidades en detrimento de otros clones. La acción humana, sin embargo, puede retrasar la sucesión indefinidamente. Crecen en la naturalidad clones nutridos en zonas de pastoreo, en claros abiertos por tendidos eléctricos y en medios alterados similares. Las condiciones que encuentran, y que, en cierto modo, también crean las plantas en dichas áreas, deben diferir bastante de aquellas otras bajo las cuales evolucionó la asclepias.

¿Qué generalizaciones cabe avanzar acerca de la relación entre las asclepias y sus numerosos visitantes? Sin duda la planta influye de forma directa en las vidas de sus polinizadores e, indirectamente, en los depredadores y parásitos, pues reúne en un mismo punto a presas y especies hospedadoras. A cambio, los polinizadores resultan esenciales para el éxito reproductor de la planta; quizás algunas especies de herbívoros ejerzan también un efecto importante sobre la asclepias. Por el contrario, ni los depredadores de polinizadores ni los parásitos de depredadores parecen condicionar el número de sus presas y hospedadores, por lo que, según parece, no aportarían gran cosa al bienestar del vegetal.

Tal conclusión quizá sea precipitada. La importancia de las relaciones indirectas entre los miembros de una comunidad puede quedar velada ante las interacciones más evidentes entre plantas y polinizadores, plantas y herbívoros y plantas y el medio físico. En este sentido, Svaťa Louda, de la Universidad de Nebraska, ha demostrado que las inflorescencias de la hierba dorada, una compuesta del género *Haplopappus,* ocupadas por la araña lince verde producen más semillas viables que aquellas otras en las que no hay arañas. Las flores con arañas tienen un porcentaje de polinización y fecundación relativamente bajo, debido en parte a que las arañas depredan a los insectos polinizadores. Sin embargo, las arañas controlan de un modo más eficaz ciertas moscas comedoras de semillas, de modo que ejercen un positivo efecto global sobre la producción de semillas.

Se presta cada vez más atención a las interacciones entre organismos en tres o más niveles de la red alimentaria. Su estudio puede revelar relaciones sutiles, que resultan importantes para el éxito de los organismos y, también, para comprender la estructura global de una comunidad. Las comunidades simples, como la de la asclepias y sus insectos asociados, ofrecen una oportunidad excelente para desentrañar las relaciones que se dan en varios niveles de ese tipo. Peter W. Price, de la Universidad del norte de Arizona, ha definido como esenciales en dichos estudios tres rasgos de la comunidad de la asclepias: puede determinarse fácilmente su composición; pueden medirse sus recursos, y el sistema se somete de forma dúctil a la manipulación experimental. Además, las observaciones son susceptibles del más directo de los métodos: los biólogos ven a los organismos en acción.

Juegos de ordenador

Una tortuosa odisea: de Robotópolis a las puertas electrónicas del Valle del Silicio

A. K. Dewdney

A modo de galaxias en colisión, los juegos computarizados y la enseñanza asistida por ordenador parecen a punto de la gran fusión. Presagio del acontecimiento fue la aparición, el año pasado, de Robot Odyssey, un juego computarizado que cumple también un papel formativo para el diseño de circuitos.

Muchos han sido los programas de instrucción asistida por ordenador basados en juegos, pero, hasta donde alcanza mi conocimiento, ninguno de la apasionante intensidad que Robot Odyssey logra de modo tan natural. Muchos juegos de ordenador han evolucionado desde el caos primigenio de las salas de vídeo-juegos hasta pisar tierra cerebral sólida. Ninguno, del valor educativo de Robot Odyssey.

Si pretende huir de Robotópolis, urbe ensoñada, exclusivamente poblada por robots, Robot Odyssey no deja al jugador más alternativas que diseñar circuitos lógicos. La mayoría de esos autómatas manifiestan abierta hostilidad a la presencia humana. Cuando el jugador (representado en la pantalla por un diminuto homúnculo) trata de recorrer un laberinto, o recoger un objeto de una habitación, un robot centinela agarra sin miramientos al homúnculo y lo tira en el umbral. Hay, sin embargo, tres robots que serán compañeros de gran ayuda en la escapada. Los circuitos internos de los robots compañeros, que los robots centinelas ignoran, les permiten eludir a los automatizados habitantes de Robotópolis, atravesar laberintos y apoderarse de objetos tales como fichas para el Metro o cristales de energía.

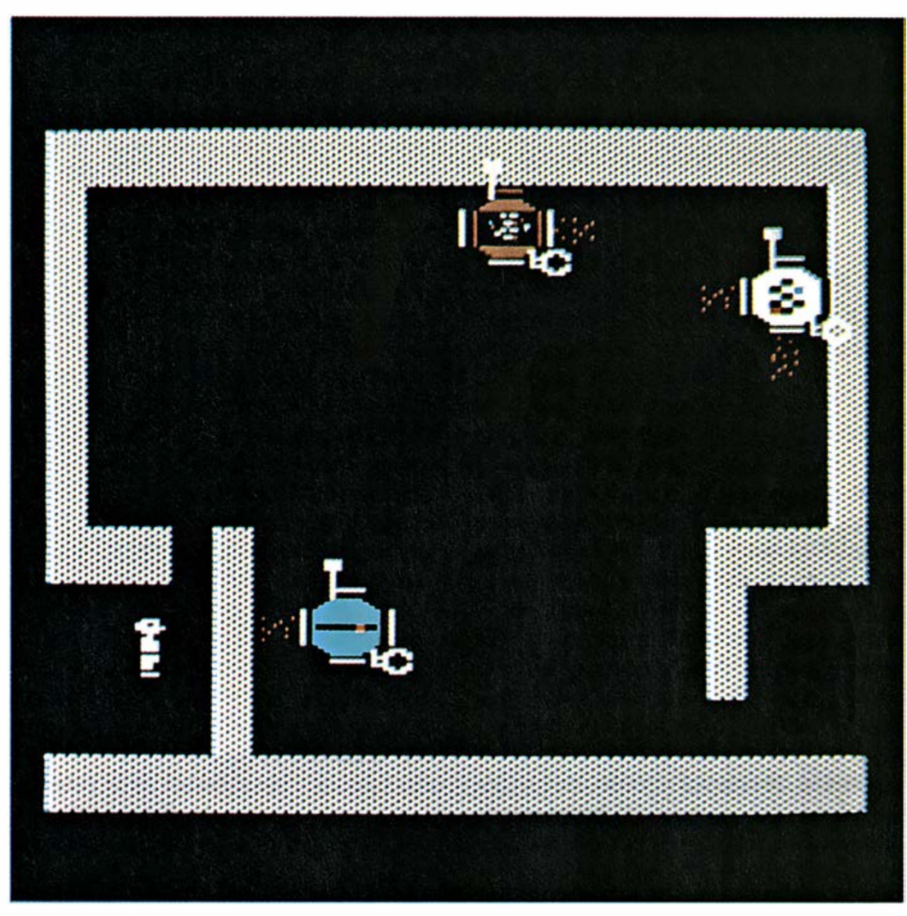
Tras una odisea robótica, ¿tendrá el jugador recursos suficientes para proyectar un ordenador? No del todo, pero sí habrá realizado una valiosa ejercitación. El juego comienza en la llamada "sala de robots". En ella, el homúnculo, que el jugador dirige desde el teclado, se reúne con los tres robots compañeros, que animadamente van de acá para allá por una región rectangular de la pantalla. Cada robot muestra un comportamiento diferente. Uno se desliza por la sala, tanteando las paredes. Otro va y viene, rebotando horizontalmente, adelante y atrás. El tercero corretea de arriba abajo, por la pared de la derecha, como buscando una salida. El jugador comienza pulsando la tecla *R* y, después, la barra espaciadora. Tal acción tiene el surrealista efecto de transformar el homúnculo en unidad de control remoto, que ordena a los robots que se detengan inmediatamente. En ese momento, el jugador puede devolver a la unidad de control remoto la apariencia homuncular que antes tenía. El homúnculo puede subir a bordo de uno cualquiera de los robots. Cuando lo hace, la escena de la habitación se sustituye por una vista del cavernoso interior del robot. El homúnculo parece haberse encogido hasta la décima parte de su tamaño primitivo. Unicamente monta en robot si tiene que atravesar un laberinto, o en alguna otra situación en que la forma de locomoción del robot le sirva de ayuda.

Cada robot de compañía está equipado para percibir su entorno, y para desplazarse por él. Detecta el contacto con las paredes por medio de topes parachoques. Dispone de cohetes impulsores, dirigidos hacia arriba y hacia abajo, hacia la izquierda y hacia la derecha. Una pinza le permite asir objetos y soltarlos y, una antena, comunicar con los otros dos robots de escolta. En el interior de cada robot, todo ese equipamiento está representado por enchufes y clavijas de conexión, que pueden conectarse directamente por cable a los circuitos lógicos de a bordo. Hay dos tipos de clavijas de conexión: conectadores de entrada, que informan al circuito del estado de los sensores (topes, pinza asidora, antena), y conectadores de salida, que trasladan a un dispositivo efector (impulsores, pinza, antena) los mandatos del circuito. Así pues, la pinza y la antena disponen a la vez de conectores de entrada y de salida. El conector de salida de la pinza la pone en funcionamiento y, el conector de entrada, da cuenta de si la pinza está en ese momento sujetando un objeto.

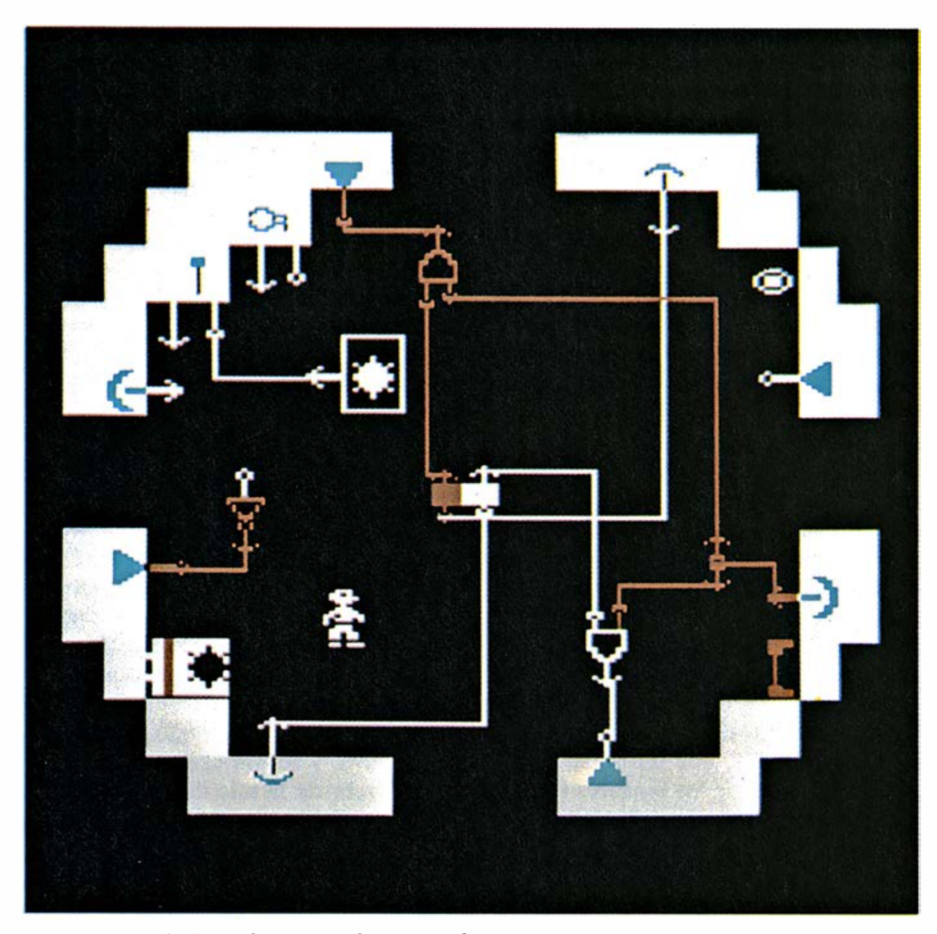
El funcionamiento del más sencillo de los tres robots compañeros muestra cómo actúan los circuitos. Este robot, de nombre Ping-Pong, está controlado por un único flip-flop (también llamado circuito biestable, circuito basculante o, brevemente, báscula) conectado a los impulsores y paragolpes horizontales. En Robot Odyssey, una báscula es una célula de memoria con dos lados; cuando uno de los lados se encuentra activo, el otro está pasivo. Por excitación de la entrada del lado pasivo, aunque sea brevemente, se produce el cambio de estado de la báscula biestable: el que era lado pasivo queda activo y, el lado antes activo, pasivo. En tanto no se produzcan cambios en las líneas de entrada, el flip-flop conserva su estado; esto es, recuerda. Basta uno de esos circuitos basculantes para generar el comportamiento de Ping-Pong. Se conecta la salida de uno de los lados de la báscula al impulsor derecho del robot y, la entrada de ese mismo lado de la báscula, al tope derecho. Supongamos que ese lado del basculante se encuentre pasivo, y que el robot toque una pared situada a su derecha. El sensor del tope se excita, y el hilo traslada la señal hasta la báscula. El lado pasivo queda activado de inmediato. El cohete impulsor derecho se enciende, y el robot comienza a moverse hacia la izquierda. Ya tenemos explicado el "ping". Para el "pong", se conectan los cables de igual manera al tope y al cohete impulsor del lado izquierdo.

Para llevar a la práctica comportamientos más complejos, hace falta la colección completa de elementos lógicos habituales. Tal conjunto cuenta no sólo con el elemento de memoria (el circuito basculante, o flip-flop), sino también con elementos de decisión llamados puertas-*o*, puertas-*y*, y puertas-*no*, o inversores. Brevemente: la salida de una puerta-*o* estará activa siempre que al menos una de sus entradas lo esté, mientras que la salida de una puerta-*y* estará activa si sus dos líneas de entrada lo están. La salida de un inversor estará activa cuando su entrada esté pasiva, y recíprocamente.

Para salir de la sala de robots, el jugador ha de hacerse con una llave, que se encuentra en el interior de uno de los robots, y abrir una puerta que conduce a la región denominada cloacas de la



1. La entrada a Robotópolis y los tres robots que allí se encuentran



2. Parachoques, cohetes impulsores, pinza, antena, conectores y circuito interno del robot Buscaderechas

ciudad. Para recoger un objeto se coloca el homúnculo sobre él, y se pulsa la barra espaciadora. Un breve pitido da cuenta de que ha habido éxito; a partir de entonces, el objeto se adhiere al homúnculo y se mueve al hacerlo él. Sin ello, Robot Odyssey sería imposible, ya que el homúnculo ha de llevar consigo los tres robots compañeros conforme va explorando los cinco niveles del juego. Pero, ¿cómo podrá llevar consigo a los robots, si sólo puede llevar un objeto cada vez? Dado que se puede meter o sacar de un robot cualquier objeto, y dado que los propios robots son objetos, el jugador no tarda mucho en pensar que un robot podría meterse dentro de otro. La cosa funciona. En efecto, el homúnculo puede arrastrar un robot al interior de un segundo robot que ya se encontraba dentro de un tercero. Esta táctica permite ahorrar espacio interior en el tercer robot; conforme se va avanzando en la aventura, el robot va atiborrándose de fichas de Metro, de sensores, de cristales de energía y de más elementos de circuitería.

Mi propia partida de Robot Odyssey comenzó con lo que parecía ser un viaje interminable a través de una serie de salas contiguas a las cloacas de la ciudad. Tras entrar en las cloacas, llegué a una sala celosamente guardada por uno de los más malvados habitantes de Robotópolis. Al fondo de la sala, apoyado en la pared, se encontraba un cristal de energía. Codiciándolo yo, hice salir del interior de Ping-Pong al robot que bordeaba paredes, y lo puse en marcha. Mi robot iba avanzando, pegado a las paredes, sin que el robot vigilante se apercibiera. Cuando por fin mi robot encontró el cristal de energía, se apoderó de él con la pinza asidora, emitiendo un pitido de aviso al hacerlo, y prosiguió contorneando las paredes hasta la entrada. Una vez allí, paré el robot y traté de retirar de la pinza el cristal de energía, pero el robot no lo soltaba. Dejé el problema, para resolverlo más adelante, y volví a meter dentro de Ping-Pong el robot corre-paredes. Estaba a punto de reanudar mi periplo cuando me llegó un fuerte rechinar, seguido de quejumbroso decrescendo, con el que el juego hace notar la descarga de una batería. Un robot vampiro, llamado Vamperio, acababa de hundir en Ping-Pong su sonda eléctrica, y de succionar la mitad de su energía. En Robotópolis es preciso estar siempre muy alerta.

Tras ir de acá para allá recogiendo objetos que me parecieron útiles, llegué a un corredor, donde el letrero preguntaba: ¿LO TIENE USTED TODO? Aún no. Se me había olvidado recoger un

imán de una sala adyacente a la cloaca, por temor de Vamperio, que, al parecer, hacía la ronda por allí. Mi hombrecillo rebasó el cartel y llegó a un laberinto llamado serpentín. El serpentín era una serie de paredes verticales, intercaladas unas en otras, que salían de lo alto y lo bajo [*véase la figura 4*]. En él montaba guardia otro maligno robot.

Uno de los robots acompañantes parecía apto para la tarea. Al ponerlo en marcha, el robot, que llamo Buscaderechas, siempre se desplaza hacia la derecha. Si una pared obstaculiza el movimiento hacia la derecha, se desliza arriba o abajo por ella, hasta dar con un muro horizontal, en cuyo momento invierte su dirección. Las razones electrónicas de tal comportamiento saltan a la vista sin más que echar una ojeada a su cableado interno [*véase la figura 2*]. Al principio, el impulsor izquierdo está siempre encendido, porque recibe la señal de un inversor no conectado a nada. (Puesto que la entrada del inversor es nula, su salida permanecerá activa.) El control de los impulsores vertical y horizontal se logra mediante un flip-flop cuyo conexionado es idéntico al del circuito que gobierna a Ping-Pong. Hay, no obstante, una diferencia sencilla: las salidas hacia los impulsores verticales han de pasar antes por puertas-*y*. El tope del lado derecho proporciona la segunda entrada a cada una de las puertas-*y*. Ello significa que la orden de encender uno u otro de los impulsores verticales no producirá efecto a menos que el tope derecho esté chocando contra algo.

Hice salir a Buscaderechas del interior del robot que llevaba conmigo, y ordené a mi homúnculo que subiera a bordo, para que lo guiase. Superponiendo el homúnculo a un "icono" con forma de ojo, obtuve una vista periscópica del entorno: en la pantalla de mi ordenador, la planta del laberinto remplazó al interior del robot. Allá, a la izquierda, estaba mi robot, con un prominente periscopio. No me quedó claro cómo puede lo visto incluir el aparato de visión, pero pasé por alto el asunto.

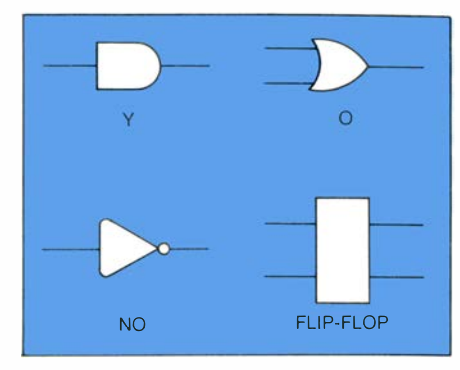
Mientras permanecía al periscopio, nada impedía al homúnculo convertirse en unidad de control. Pulsé la *R*, y después, el espaciador. El robot, con mi homúnculo a bordo, se deslizó hacia el interior del serpentín, y tropezó con una pared. Tanteamos hacia arriba hasta encontrarnos con lo alto del laberinto, y entonces rebotamos, hasta dar con un hueco en la pared. Aquí, en la parte interior del laberinto, se encontraba una colección de homúnculos desafortunados, que no habían conseguido atravesar el serpentín. Nos deslizamos junto al robot centinela, que al parecer no sabía que un humano montaba en Buscaderechas. Cruzamos el portillo, nos tropezamos con otra pared vertical, y tanteamos hacia arriba. Por fin llegamos al otro lado del laberinto, cuando me di cuenta de la grave estupidez que había cometido: me había dejado atrás a mis otros dos compañeros. El miedo al Vamperio me había impedido pensar con lucidez. ¿Cómo regresar por ellos? Iba a tener que cambiar las conexiones de los circuitos del robot Buscaderechas. Los lectores dispuestos a dedicar un momento al análisis de sus circuitos probablemente adviertan de inmediato cómo montar el nuevo cableado.

Para llevar a cabo la tarea de recablear un robot se pulsa la *S;* el homúnculo se transforma así en un soldador eléctrico. Ahora se usa la barra espaciadora para deshacer las antiguas conexiones y soldar las nuevas. Si falta alguna pieza, se pulsa una *T;* aparecerá entonces una caja de herramientas en la pantalla. El homúnculo puede entrar en ella y tomar el elemento necesario.

Cuando por fin logré reunir los tres robots al otro lado del sepentín de la cloaca, proseguí mi odisea. Llegué seguidamente a una cámara cerrada con llave. Utilizando la llave, la abrí, entré y descubrí que la cámara no tenía más salidas. ¿A dónde ir? En una de las paredes podía leerse PREPÁRESE PARA UN EXPERIMENTO QUE LE TRANSPORTARÁ A UNA NUEVA DIMENSIÓN. En el centro de la sala, una fantasmagórica copia del homúnculo danzaba de acá para allá metido en una caja inmóvil.

En cualquier momento de Robot Odyssey puede guardarse el juego en un disco de reserva. Si las jugadas siguientes conducen a un desastre, cabe repetir el juego desde el punto en que lo guardamos. Muchos juegos de aventura presentan hoy esa misma característica. Esperemos que los jóvenes aficionados no saquen la impresión de que la aventura que llamamos vida puede también guardarse y ponerse a salvo, para volverla a jugar.

Tras guardar mi partida, superpuse mi homúnculo a su sosias, y pulsé la barra espaciadora. El mundo pareció reventar en una lluvia de estrellas, y un sonido extraño acompañó mi viaje a una nueva dimensión. En realidad, había tomado tierra en otra sala del segundo nivel de Robotópolis, pero sin mis compañeros. Al parecer, debía habérmelos traído conmigo. Gracias a la copia de la partida, que había guardado, pude repetir la transducción dimensional, llevando esta vez, firmemente asidos, a mis robots.



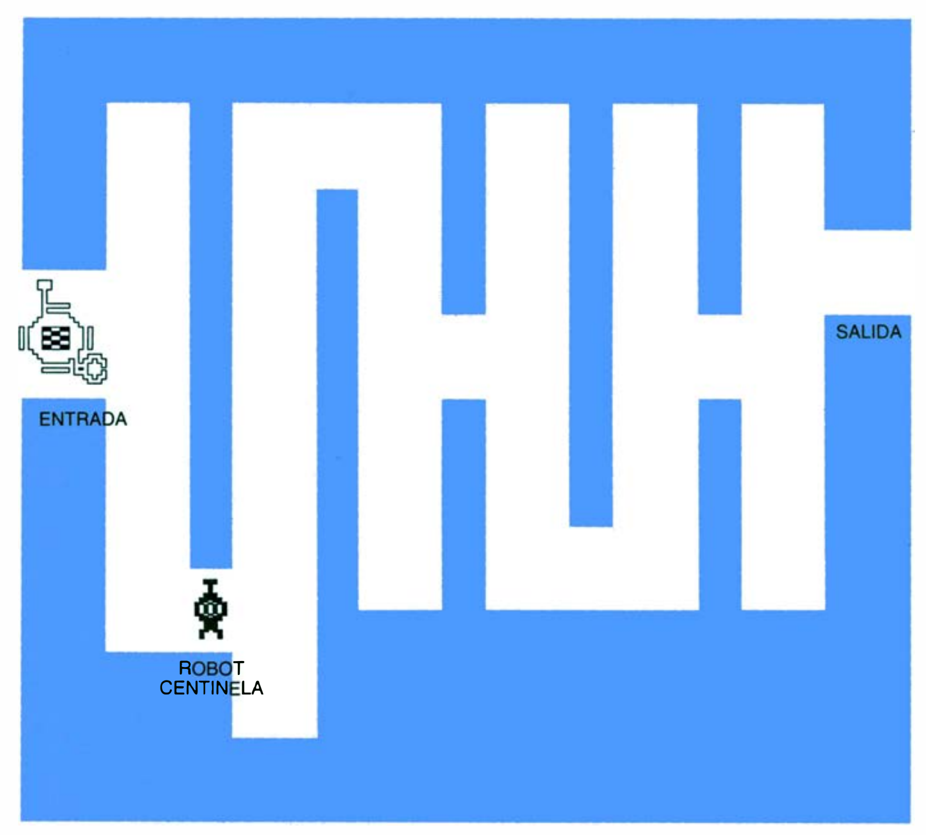
3. Elementos lógicos de Robot Odyssey

Seguir describiendo mis restantes aventuras en Robotópolis seguramente les aguaría la fiesta a los lectores que quieran jugar por sí mismos. El juego de Robot Odyssey lo venden con discos, para autodidaxis por ordenador, sobre anatomía robótica, empleo del neceser de herramientas y diseño de microcircuitos. Se dispone de este recurso en un lugar llamado laboratorio de innovaciones. En cualquier punto de la partida, el jugador puede visitar el laboratorio, para ensayar un nuevo diseño de circuitos de los robots de que allí se dispone. Al crecer los circuitos en tamaño y complejidad, resulta muy útil transferirlos a microcircuitos; el laboratorio dispone de una sala adecuada para ello.

Uno de los robots compañeros, el Correparedes, ya venía provisto de un avanzado microcircuito. Vemos, esquemáticamente, sus puntos de conexión en la figura 5. Los lectores disfrutarán, sin duda, con el diseño de un circuito que permita ir siguiendo las paredes, que luego se condensará en tal microcircuito. Sólo cabe utilizar basculantes y las puertas lógicas descritas.

El juego Robot Odyssey lo idearon y redactaron Michael Wallace, a la sazón alumno de la Universidad de Stanford, y Leslie Grimm, de la Learning Company. El juego tiene precursores en el catálogo de la Learning. Los llamados Gertrude's Puzzles y Rocky's Boots exigen ambos que el lector diseñe circuitos lógicos para resolver problemas. Warren Robinett, quien perteneció a la Learning Company, ha proporcionado a todos estos juegos ambientes verdaderamente apasionantes. Por ejemplo, el número de salas y corredores de Robotópolis es finito y, sin embargo, su presentación prosigue indefinidamente, al menos hasta que el jugador cae en la cuenta de que salir por el lado derecho de una sala puede muy bien suponer entrar por el lado izquierdo de otra ya visitada.

El diseño de circuitos para Robot



4. El serpentín de la cloaca: un laberinto que debe resolver el robot Buscaderechas

Odyssey es tarea muy diferente de la de proyectar uno para un ordenador moderno. No obstante, se podría llegar a construir un ordenador rudimentario por medio de los componentes que el juego proporciona. Quienes adquieran suficiente maestría en él pueden sentir la curiosidad de saber si podría diseñarse una computadora que cupiera en un único robot. La programación de semejante computadora podría hacerse dándole como señales de entrada una serie de ceros y unos justamente antes de ponerlo en funcionamiento. Tal secuencia sería una especie de lenguaje de programación ultrasencillo, en el cual, las subsucesiones podrían representar instrucciones tales como "avanzar hacia la derecha hasta tropezar con la pared" o "hacer funcionar la pinza".

El diseño de circuitos lógicos para los modernos ordenadores consiste en disponer sobre un enorme plano almacenado en un ordenador inmensos números de transistores, condensadores y otros componentes. Una vez verificado y depurado el funcionamiento del circuito mediante simulación, el plano puede transferirse a película fotográfica y luego grabarse por medios fotoquímicos sobre una lámina de silicio. A primera vista, este proceso, extraordinariamente intrincado y complejo, parece estar sólo de lejos emparentado con las puertas lógicas y los circuitos biestables de la Robot Odyssey, o con los recursos de fundamentos de diseño de circuitos lógicos que algunas universidades imparten. La conexión me la aclaró hace algunos años Christopher R. Clare, quien actualmente se encuentra en la CTX International de Sunnyvale, California. Según Clare, lo que se pretende al presentar el diseño de circuitos por medio de la lógica formal es estimular al futuro ingeniero a plantearse y resolver el problema de modo abstracto. Encarado a un problema a resolver, el truco consiste en elevarlo al dominio abstracto de las puertas *y, o, no* y de los elementos biestables, y resolverlo en ese nivel. El hábito de pensar en abstracto es transferible al dominio, más complicado, de los transistores de efecto de campo, y de otros componentes muy modernos, que corresponden a otros tipos de puertas lógicas.

Según Peter Ashkin, director de proyectos de Apple Computers, la Robot Oddysey sirve a tal propósito. Ashkin opina que el juego enseña al ingeniero de diseño dos artes fundamentales. La primera, la capacidad para descubrir exactamente qué problema está uno tratando de resolver; la segunda, la capacidad de plasmar la solución en expresiones lógicas, no importa de qué tipo. Por ejemplo, la última vez que jugué a "Odisea", se me planteó el problema de apoderarme de una ficha de Metro que se hallaba en el centro de una estancia vigilada. Era evidente que el problema consistía en lograr que uno de los robots de escolta se hiciese con la ficha. ¿De qué modo lograr tal objetivo? El Correparedes no serviría, porque nunca se aproximaría a la ficha lo suficiente para recogerla. Se disponía de un detector de fichas, equipado con salidas direccionales, que sin duda conseguiría conducir el robot hasta la ficha; lo malo era que ese mismo detector impediría que, una vez allí, el robot retornase con su botín. Sea como fuere, el análisis del problema dio como resultado la identificación de dos tareas bien diferenciadas: diseñar un circuito buscafichas y una conducta fácil de programar que hiciera salir de la sala al robot. Ashkin señala que, aunque algunos problemas sean muy nebulosos, pueden irse resolviendo porciones de ellos. Los problemas van, así, perfilándose mejor. Los dos procesos, el de la definición del problema y el de ir dando forma lógica concreta a partes de él, intervienen ambos en el proceso de diseño.

Al enseñar a los jugadores cómo diseñar circuitos, Robot Odyssey ofrece también un importante beneficio de carácter psicológico, a saber, la sensación de dominio que se va desarrollando en el jugador conforme va éste adquiriendo confianza en su capacidad para cablear sus robots de escolta. La confianza en sí mismo sirve de antídoto frente al sentimiento de fría inaccesibilidad que los ordenadores pueden inspirar. El aprendizaje de la lógica formal y de cómo materializarla en los robots de la Odisea hace comprender que existe la misma relación entre los elementos básicos de un ordenador y sus funciones últimas. No existen barreras que impidan seguir explorando; el sentimiento de misterio que inspira el contenido de la caja queda remplazado por otro de dominio sobre ella.

Según Sherry Turkle, autora de *The Second Self,* esta sensación de dominio es una de las fases por las que puede pasar el neófito en informática. Su libro describe documentadamente las relaciones que se están desarrollando entre personas y ordenadores. Algunas historias, las de quienes han llegado a verse a sí mismos como máquinas, son de una ominosa cualidad. A mí me parece que tal opinión sobre uno mismo puede darse, cualquiera que sea la maestría que se tenga en el campo de la informática. Sé de científicos y de especialistas en inteligencia artificial que se ven a sí mismos de igual manera, sólo que en un nivel más refinado. Tal vez sea verdad que en cierto sentido todos somos máquinas, pero es una concepción que de poco nos sirve para conducirnos, y

que puede inducirnos a adoptar modelos de conducta desastrosos. He aquí por qué, metafóricamente hablando, podría resultar útil adquirir la habilidad de escapar de Robotópolis.

Las respuestas de los lectores a las "cinco piezas sencillas", descritas en el artículo de junio pasado generan un histograma que se asemeja mucho a una distribución exponencial negativa. Fueron centenares los lectores que desarrollaron la primera pieza, un programa llamado PINT, cuya función era dar un valor aproximado del número pi. Tan sólo unos pocos llegaron a la quinta pieza, un programa que remeda el comportamiento de las colas.

En PINT se disparan imaginarias balas de cañón a un campo simulado que circunscribe una charca simulada. Pido perdón a los miles de vecinos a quienes los cañonazos mantuvieron despiertos toda la noche.

En cuanto uno escribe un programa para generar pi por ese procedimiento, la tentación de rebasar el número de 1000 disparos parece irresistible. En esta "pieza", el campeón es Joshua Simons, de la Facultad de Medicina de Harvard, quien hizo funcionar el programa toda una semana en un gran ordenador, y llegó a lanzar casi 4000 millones de tiros al charco. La estimación de pi así obtenida resulta ser 3,14157. Desdichadamente, la quinta cifra decimal de pi es 9, y no 7.

A la hora de escribir este artículo, tan sólo 134 lectores han presentado estimaciones de "pi" generadas por 1000 lanzamientos. Cuando los lectores presentaron los resultados de varias pasadas, elegí únicamente la primera para formar el gran promedio. Hélo aquí:

3,14137

Las tres primeras cifras que siguen a la coma decimal son correctas. La cuarta cifra decimal de pi no es 3, sino 5.

Calculé también otro promedio, compensado por la longitud de cada pasada, para la totalidad de pasadas de más de 1000 tiros. Unas cuantas pasadas de millones de tiros pudieran haber distorsionado la estimación:

3,13948

Joseph W. McKean, estadístico de la Universidad del oeste de Michigan en Kalamazoo, Michigan, señala que podemos establecer un intervalo de confianza del 95 por ciento en torno a la estimación que cada cual obtenga. Se supone que la estimación cae en el centro de una gama de números, que componen el intervalo de confianza. El intervalo se define de manera tal que, la probabilidad de que pi se encuentre en algún lugar del intervalo, es del 95 por ciento. La longitud del intervalo varía en razón inversa de la raíz cuadrada de n, número de disparos efectuados. Así pues, para aumentar en un factor 10 la precisión del valor estimado, es necesario multiplicar n por un factor 100.

Quienes probaron su mano con ZOMBIE no tuvieron ninguna dificultad para generar histogramas que remedasen la forma de la distribución exponencial negativa, que puede verse en una de las ilustraciones del artículo de junio.

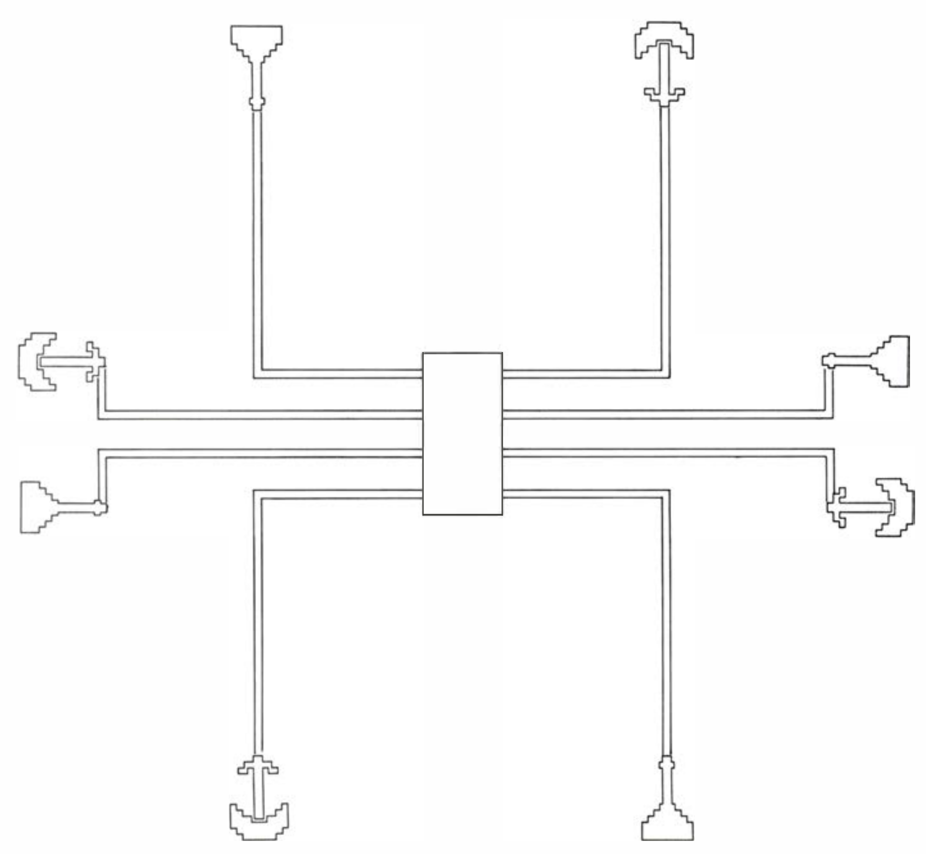
El programa GALTON dejó intrigado a Edgar F. Coudal, de Illinois. En la simulación que hizo de las bolillas rodando cuesta abajo por entre una formación triangular de clavos obtuvo al pie de la tabla de Galton la distribución que era de esperar: la distribución binomial, cuya forma, discretamente acampanada, va pareciéndose progresivamente más a su famosa pariente continua, la distribución normal.

En sorprendente ejemplo de invención simultánea, a dos lectores se les ocurrió generalizar GALTON, usando una formación tridimensional de clavijas. Al pie de sus tableros simulados, J. Michael Matuszewicz y James Nugent encontraron un redondeado montoncito de canicas. ¿Podrá el lector conjeturar su forma?

Algunos lectores que probaron a programar VOTANTES obtuvieron descorazonadores resultados. En uno de los casos, ni siquiera al cabo de toda una noche de funcionamiento se produjo la esperada caída de la democracia. Lo único que puedo sugerir a estos experimentadores es que hagan funcionar todavía más tiempo sus programas. Los míos han requerido casi todo un día de trabajo.

Finalmente, sólo dos lectores probaron suerte con EN-COLA, una simulación de la cola de clientes que se formaría en un banco con un único cajero. Victor H. Auerbach, de Philadelphia, preparó una versión ligeramente distinta del programa, observando cómo crecía regularmente la longitud de la cola, si bien, con muchos acortamientos de breve duración. Joshua Goodman, de Quincy, Massachusetts, también modificó EN-COLA, pero mucho más drásticamente: sustituyó el sistema de zombies por dos portillos pasa-zombies en un solo muro.

El listado del programa GUSANO para el ordenador Apple II-C, que apareció en el artículo de mayo, padeció una leve infección tipográfica. El segundo número del enunciado DATA de la línea 100 debía haber sido 255. Tal como están las cosas, el gusano repta a través de la memoria a paso penosamente lento.



5. Parachoques, impulsores y conectores del robot Correparedes. ¿Qué circuitos contiene?

Taller y laboratorio

El lanzamiento de la mosca esclarece ciertos aspectos de la pesca al lanzado

Jearl Walker

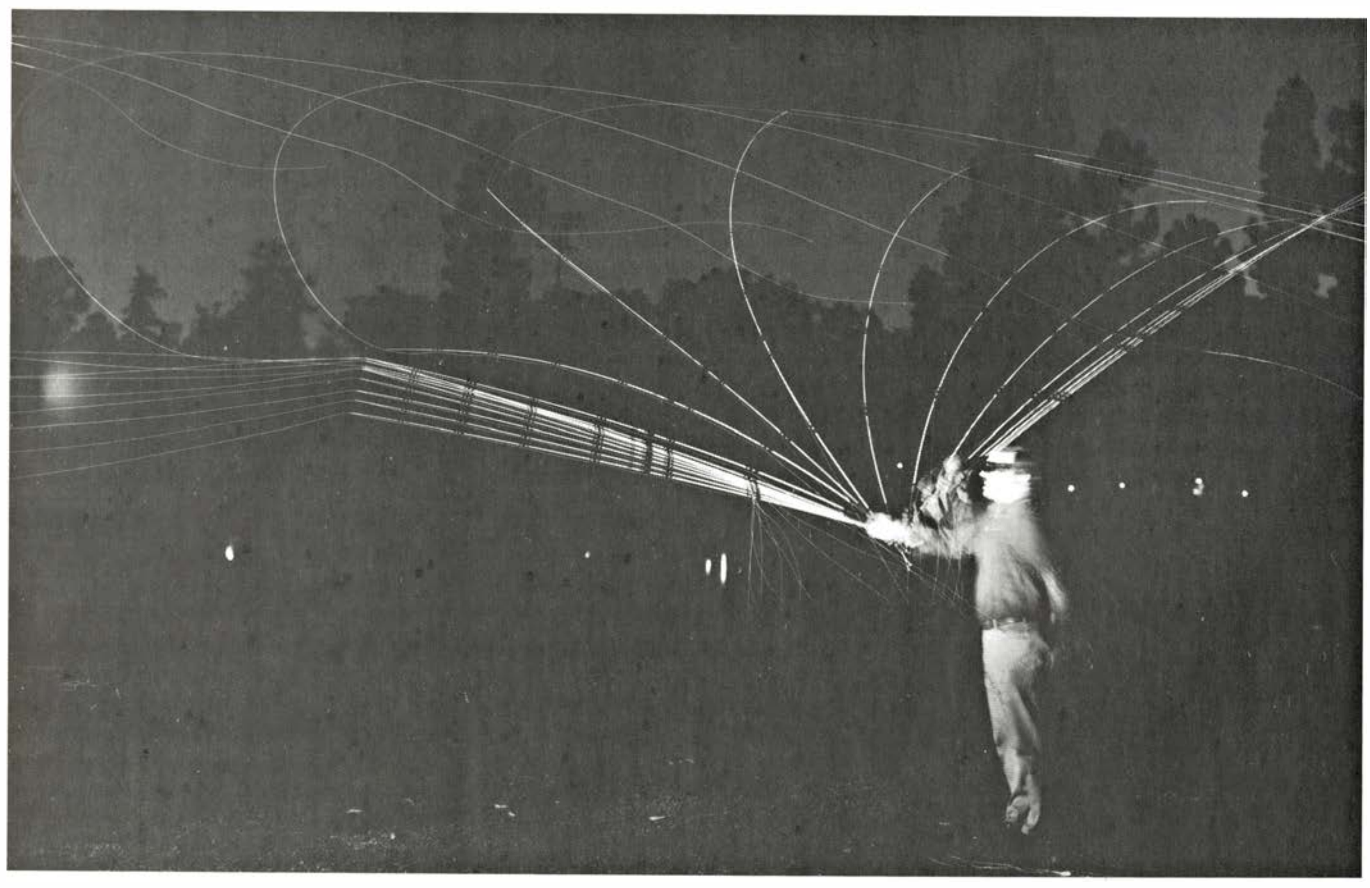
Un pescador que lance una mosca, ¿cómo debe mover la caña y arrojar el sedal? La resistencia del aire afecta fuertemente a la mosca, ¿cómo, entonces, puede ésta seguir hacia adelante cuando la caña se detiene? ¿Impulsa a la mosca la flexión de la caña igual que un arco impulsa a una flecha? ¿Por qué se cambian cañas y sedales según los tipos de pez que se pretenda capturar? ¿De qué modo resiste el pescador el tirón del pez atrapado y recobra sedal?

Inspirándome en manuscritos de varios investigadores, he estado examinando estas y otras cuestiones relativas a la física de la pesca al lanzado. Edward Mosser, de Burbank, y William W. Buchman, de Los Angeles, han publicado un artículo sobre la dinámica del lanzamiento de la mosca. Mosser, además, ha escrito sobre el tema varios artículos no publicados. Graig A. Spolek, de la Universidad estatal de Portland y Steve C. Fry, de Hawthorne, California, me han remitido, por separado, unos manuscritos en los que estudian matemáticamente un lanzamiento de mosca.

Spolek analiza un lanzamiento hacia adelante por encima de la cabeza. Inicialmente, la longitud de sedal que sobresale de la punta de la caña es corta. Para alargar sedal y preparar el lanzamiento final, el pescador realiza una serie de tanteos hacia adelante y atrás en los que la mosca no toca el agua. En cada uno de estos balanceos el pescador mueve el extremo de la caña por encima de su cabeza y levemente hacia atrás y, luego, rápidamente, hacia adelante. El sedal lo sigue. Aunque la caña puede que no se desplace apreciablemente de la vertical en el balanceo atrás, el sedal se estira horizontalmente (a causa de su movimiento hacia atrás) justo cuando se inicia el lanzamiento adelante.

En los balanceos adelante el pescador impide que la mosca toque el agua tirando de la caña hacia atrás. Durante los balanceos atrás los pescadores diestros se sirven de la mano izquierda para sacar más sedal del carrete y mantenerlo arrollado en ella. Luego, durante el balanceo adelante, sueltan ese suplemento de sedal cuando el impulso hacia adelante del sedal en movimiento tira a través de las guías de la caña. Así aumenta la longitud total de sedal en movimiento.

Una vez que hay suficiente sedal suelto, el pescador vuelve a llevar hacia atrás la punta de la caña y, seguidamente, realiza un balanceo final adelante, esta vez deteniendo la caña en su movimiento hacia adelante y dejando que la mosca aterrice en el agua. Lo que ha estudiado Spolek es el vuelo del sedal y la mosca durante este lanzamiento adelante. En la figura 1 se muestra una foto bajo luz estroboscópica de uno de estos lanzamientos realizado por Edward Mosser.



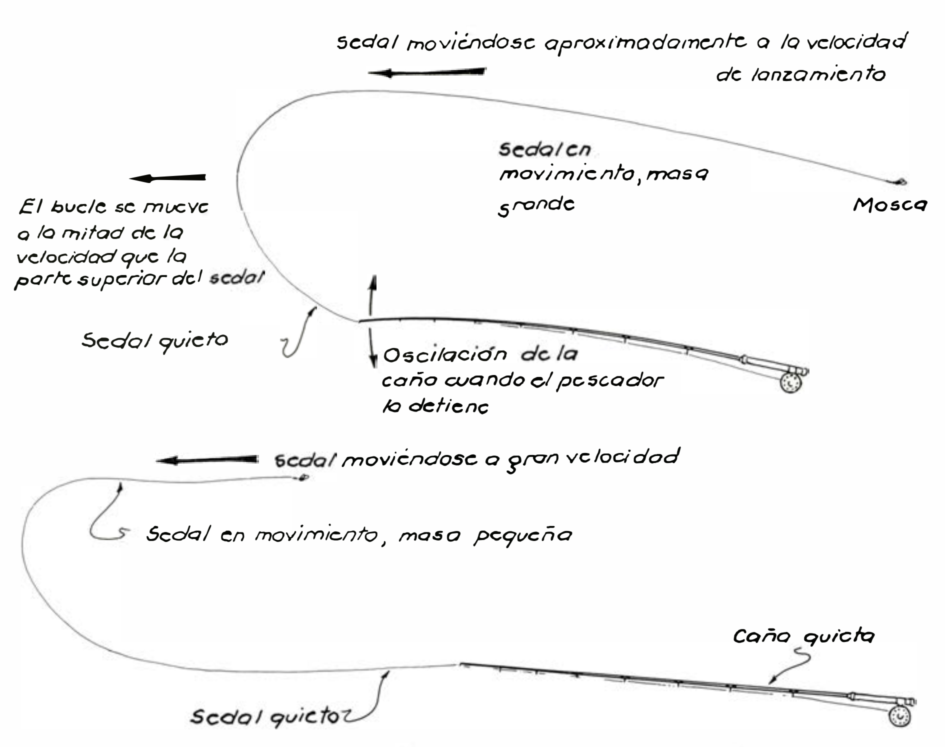
1. Un lanzamiento de Edward Mosser bajo luz estroboscópica

Dada la resistencia del aire sobre la mosca, asombra la habilidad con que los pescadores la impulsan hacia distancias importantes. Imaginemos lo que sería arrojar una mosca sin sedal. Para igualar las distancias corrientemente alcanzadas con el aparejo de pesca harían falta esfuerzos titánicos. Spolek calcula que, para lanzar a 20 metros una mosca normal desde una altura inicial de un metro y medio, la velocidad de lanzamiento debe superar los 480 kilómetros por hora. Como la mosca está unida a un sedal que asimismo encuentra resistencia en el aire, el valor teórico de la velocidad inicial es, a lo que se ve, más elevado. Y, aunque se aduzca el efecto amplificador de la longitud de la caña, pese a ello la resistencia del aire sobre el sedal y la mosca deberían imposibilitar los lanzamientos largos.

Este misterio lo ha resuelto mucha gente estudiando la física del lanzamiento. En los lanzamientos adelante interviene un sutil mecanismo que acelera el sedal y la mosca tras salir despedidos de la caña. Este mecanismo lo conoce todo pescador experimentado, pero Spolek demuestra la razón matemática de su eficacia.

Para explicarlo, seguiremos las fases de un lanzamiento adelante sin olvidar el análisis de Spolek. Comenzaremos por el final del balanceo atrás, punto en que el sedal se extiende recto hacia atrás. Cuando el pescador gira la mano y la mueve hacia adelante, la caña, flexible, se comba hacia atrás, demorando el movimiento hacia adelante de la punta de la misma, el sedal y la mosca. Una vez que comienzan a moverse, el sedal y la mosca poseen la misma velocidad que la punta de la caña hasta casi el final del movimiento de la caña. En cuanto el pescador reduce la velocidad de ésta para detenerla en su posición más adelantada, el sedal se desplaza a la velocidad que tenía cuando la velocidad de la punta de la caña era la máxima. Esta es la velocidad de lanzamiento.

Cuando la caña aminora de velocidad, el sedal va más rápido y vuela por encima de la punta, formando un bucle convexo hacia adelante. Entre este bucle y la punta, el sedal está inmóvil, pues lo está la punta. Entre el bucle y la mosca el sedal prosigue avanzando. Inicialmente, la mayor parte del mismo está por encima del bucle y se mueve, pero como éste lo hace a una velocidad mitad que la parte superior del sedal, la parte en cuestión atraviesa gradualmente el bucle y se detiene. Cuando el extremo del sedal llega al bucle la mosca latiguea y el sedal se estira. Desde ahí, mosca y sedal caen al agua.



2. Cómo produce la aceleración el bucle del sedal

En los lanzamientos largos el bucle es el mecanismo propulsor. Sirve para concentrar energía cinética en la porción de sedal, continuamente decreciente, situada por encima del bucle. Podemos estudiar la transmisión de energía empezando por la situación del sedal inmediatamente antes de que se forme el bucle. Su energía cinética vale entonces el producto de la mitad de su masa por el cuadrado de su velocidad (que es la velocidad de lanzamiento). Esta energía se la ha suministrado el pescador.

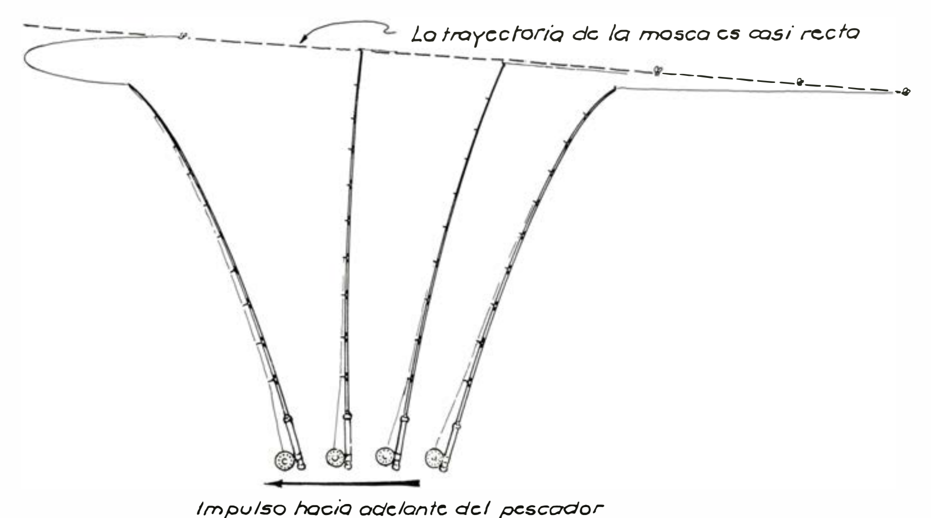
Para simplificar ignoremos, momentáneamente, la resistencia del aire sobre el sedal y la mosca. El sedal, una vez lanzado, no puede variar de energía cinética, pues sobre él no se realiza trabajo. Su energía cinética permanece constante. Pero, como decrece la cantidad de masa en movimiento, la velocidad debe aumentar al objeto de que se conserve la energía cinética. Por tanto, la parte de sedal por encima del bucle, y la mosca a éste unida, se aceleran hacia adelante. Esa aceleración no cesa hasta que el extremo del sedal atraviesa el bucle. El lanzamiento de la mosca es, de hecho, un caso de conservación de energía cinética en el que se produce aceleración a medida que disminuye la cantidad de masa en movimiento.

Spolek considera de qué modo el aire altera este sencillo modelo. La resistencia disminuye la aceleración porque el sedal y la mosca pierden energía al moverse, ya que realizan trabajo sobre el aire que hienden; pero esa pérdida no basta para impedir un lanzamiento largo.

Buena parte de la resistencia del aire sobre el sedal procede de la gran sección transversal que el bucle presenta al aire. Los pescadores expertos saben que un lanzamiento preciso y de buen alcance requiere que se forme un bucle de poco diámetro (algo menos de un metro). Un bucle mayor comporta mayores pérdidas de energía y lanzamientos más cortos y menos precisos. ¿Le es posible al pescador rebajar el diámetro del bucle hasta menos de un metro? Posiblemente no, ya que la flecha de la caña, al mecerse en torno a su posición de reposo final, lo agranda.

Para examinar la mecánica de los lanzamientos Spolek calculó la velocidad de salida o de lanzamiento necesaria cuando el sedal tiene una longitud de 20 metros y la velocidad final de la mosca es de 30 metros por segundo antes de chasquear. Admitió que el sedal tenía una densidad uniforme con una masa característica de este tipo de cordeles. Supuso, asimismo, que el bucle fuese de noventa centímetros. Encontró que, despreciando la resistencia del aire, el sedal y la mosca debían tener una velocidad de salida de unos seis metros por segundo.

Spolek hizo también cálculos en torno a un aparejo llamado sedal de doble conicidad. Este es estrecho y de diámetro uniforme a lo largo de los primeros sesenta centímetros, luego aumenta de diámetro continuamente a lo largo de los 3 metros siguientes para



3. *Movimiento de la mosca en un lanzamiento adelante*

convertirse después en uniforme. En los primeros nueve metros su masa es la misma que la de un sedal uniforme. Spolek encontró que la velocidad de salida para este sedal y su mosca era inferior a los seis metros por segundo. Como el diámetro del sedal de doble conicidad decrece hacia el extremo, la cantidad de masa en movimiento decrece más rápido que si el sedal fuese uniforme. Si en ambos casos la velocidad final es de 30 metros por segundo, la mayor aceleración que proporciona el de doble conicidad requiere una velocidad de lanzamiento menor.

Cuando Spolek incluyó en sus cálculos la resistencia del aire, descubrió algunos cambios interesantes en la aceleración. Si la mosca está unida a un sedal uniforme, debe lanzarse a más de 30 metros por segundo para que alcance una velocidad de 30 metros por segundo. Más interesante es su descubrimiento de que, al principio, la velocidad decrece gradualmente y luego, cerca del fin de la trayectoria, aumenta rápidamente hasta su valor final. Estas variaciones las explica Spolek en función de la pugna entre la concentración de energía cinética en la masa móvil decreciente y la disipación de energía por la resistencia del aire. Inmediatamente después de formarse el bucle, el ritmo al que se pierde energía por la resistencia del aire es mayor que el ritmo al que se concentra energía. Sedal y mosca aminoran entonces de velocidad. Pero hacia el final del lanzamiento comienza a predominar el ritmo de concentración de energía y ambos se aceleran.

Un sedal de doble conicidad que sufra la resistencia del aire necesita una velocidad de lanzamiento mayor que un sedal uniforme. Como en el caso de éstos, la velocidad del sedal y la mosca disminuye inicialmente, pero hacia el final del lanzamiento aumenta repentinamente y luego decrece. Aceleración que algunos pescadores llaman "tirón", por la acción de la mosca sobre el sedal.

Para sus cálculos Spolek ha ideado dos sedales experimentales conificados en toda su longitud. A lo largo de los nueve primeros metros los dos tienen la misma masa que el sedal uniforme. En uno de ellos, llamado sedal de conificado largo, la variación de diámetro por unidad de longitud es igual que en el de doble conicidad. En el otro, llamado sedal de conificado experimental, la conificación es más gradual. Según los cálculos de Spolek, la velocidad de la mosca del extremo de un sedal de conificado largo aumenta primero y luego disminuye hacia el final del vuelo. Cuando se emplea un sedal experimental, la velocidad de la mosca aumenta durante todo el trayecto.

Con el sedal de conificado largo la mosca requiere la mínima velocidad de lanzamiento y sólo un poco más con el experimental. Ambas son menores que la velocidad final de 30 metros por segundo. Con los sedales uniforme y de doble conicidad las velocidades de lanzamiento exceden de la final. Pero estas diferencias quizá no tengan especial relevancia, pues todas las velocidades de lanzamiento caen dentro de la capacidad del pescador.

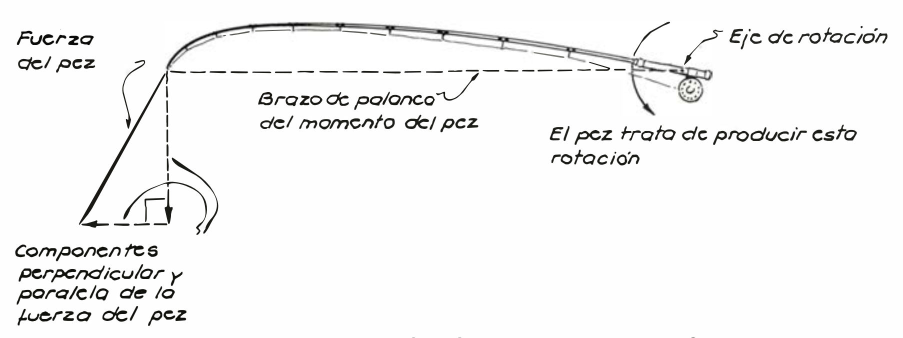
Un dato más importante podría ser la energía que el pescador debe comunicar al sedal. Si durante una excursión realiza muchos lanzamientos, su deseo será minimizar la energía requerida en cada uno. Spolek ha calculado que el sedal uniforme precisa de la energía mínima, seguido (en este orden) del conificado experimental, el de doble conicidad y el de conificado largo. Este último necesita casi el doble de energía que el uniforme.

El análisis de Fry trata de la dinámica del sedal y la caña durante el impulso hacia adelante. Su modelo consiste en una fuerza externa (del pescador) que comprime un resorte (la caña) unido a una masa (la de la caña). El resorte impulsa hacia adelante una segunda masa (el sedal).

La dinámica de este modelo puede examinarse sólo aproximadamente. Una gran parte de su complicación proviene de la resistencia del aire, que afecta a la caña cuando ésta se mueve hacia adelante y también cuando oscila al comienzo y al final de ese movimiento.

Durante el impulso hacia adelante la fuerza sobre la caña aumenta rápidamente y después disminuye. Inicialmente, la resistencia sobre el sistema es pequeña porque todos sus componentes se mueven despacio. Pero, conforme aumenta la velocidad, crece la resistencia. Fry ha encontrado que, a mitad de camino del impulso adelante, una buena parte de la energía comunicada por el pescador se gasta en acelerar el sedal, mientras que se consume algo menos en acelerar la caña. En la resistencia del aire sobre la caña se disipa mucha menos energía, y menos aún en la resistencia del aire sobre el sedal.

Mosser y Buchman han estudiado cómo ejecutar un lanzamiento adelante para transmitir al sedal y la mosca una gran dosis de energía. Así, si el balanceo atrás no ha dirigido el sedal derecho hacia la retaguardia, parte del mo-



4. *Momento producido por un pez apresado*

vimiento adelante de la caña se desperdiciará en estirarlo y el pescador dispondrá de menos tiempo para realizar trabajo y comunicarle energía. Otro error corriente es rotar la caña sin impulsarla hacia adelante. En este caso el sedal y la mosca describen un arco y no una línea recta, con lo que el trabajo sobre ellos volverá a ser menor y obtendrán menos energía cinética.

Es creencia de algunos aficionados que la flexión hacia atrás de la caña durante el último balanceo atrás almacena energía en ella, posibilitando que funcione a modo de arco. Según estudios realizados por Mosser, Buchman y Fry, no es mucha la cantidad de esa energía almacenada que acaba como energía cinética del sedal y la mosca.

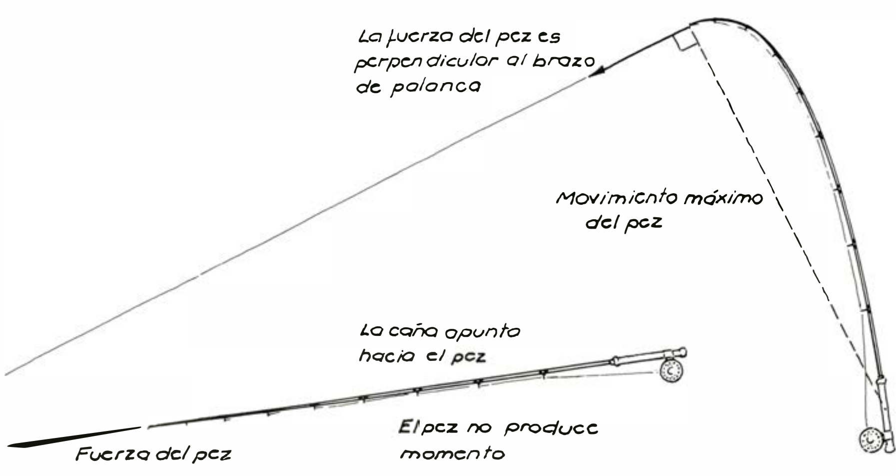
Ahora bien, en los balanceos adelante, la flexión de la caña sí cumple una sutil función, permitiendo que el sedal y la mosca sigan una trayectoria casi horizontal e incrementando el rendimiento del esfuerzo del pescador. En efecto, si la mosca describe un arco, parte del esfuerzo se gastará en tirar de ella hacia arriba y luego hacia abajo, a lo largo del arco, trayectoria ésta que le priva de velocidad adelante.

El tamaño correcto de una caña lo determina en parte el pez a capturar y, además, la comodidad. La ventaja de una caña larga estriba en que, para un movimiento adelante dado de la mano del que la maneja, la punta recorre una distancia mayor que con una caña más corta. De este modo el pescador dispondrá de más tiempo para actuar sobre el sedal y la mosca, comunicándoles más energía cinética. El inconveniente de una caña larga es que cuesta más moverla y hacerla girar. Y si es demasiado larga, el pescador se ve obligado a manejarla con una lentitud excesiva para los lanzamientos. Habitualmente el dilema se resuelve eligiendo una caña que suponga un compromiso adecuado entre ambos extremos.

Cuando hay un pez en el sedal, ¿qué determina la fuerza que se ejerce sobre el anzuelo? ¿Depende de la longitud y la flexión de la caña? Sostiene Mosser que la flexión no determina la fuerza sobre el anzuelo y que una caña larga quizá represente un inconveniente a la hora de porfiar con un pez vigoroso. Si el tirón de éste sobrepasa la resistencia total del sedal, el carrete largará una longitud adicional. En ese momento se dice que el pez "corre". Cuando esto ocurre, la fuerza sobre el anzuelo supera a la resistencia del sedal, pero por lo demás la fuerza jamás será mayor que la resistencia, por mucho que se flexione la caña.

Con un pez en el sedal el pescador siente un tirón directo y un momento de giro que tiende a rotar la caña en torno a un eje contiguo a su mano. El brazo de palanca de ese momento de giro es una recta que va desde el eje de rotación, en la empuñadura, hasta la punta de la caña, donde está aplicada la fuerza ejercida por el pez. Esta podemos separarla en dos componentes, una paralela al brazo de palanca y la otra perpendicular al mismo. Es esta componente perpendicular la que produce el momento de giro, cuyo valor es el producto de dicha componente por el brazo de palanca.

El valor de las componentes la determinan dos factores: la fuerza que ejerce el pez y la orientación del tirón con respecto al brazo de palanca. Si el pescador apunta la caña hacia el pez, se anulará el momento al no actuar sobre la caña una componente de fuerza perpendicular. En este caso toda la fuerza que ejerce el pez se aplica paralelamente al brazo de palanca, y el pescador tira en sentido contrario para retener la caña. Si el pescador gira la caña hacia la vertical, de tal modo que la fuerza del pez actúe por completo perpendicularmente al brazo de palanca, el momento de giro será máximo.

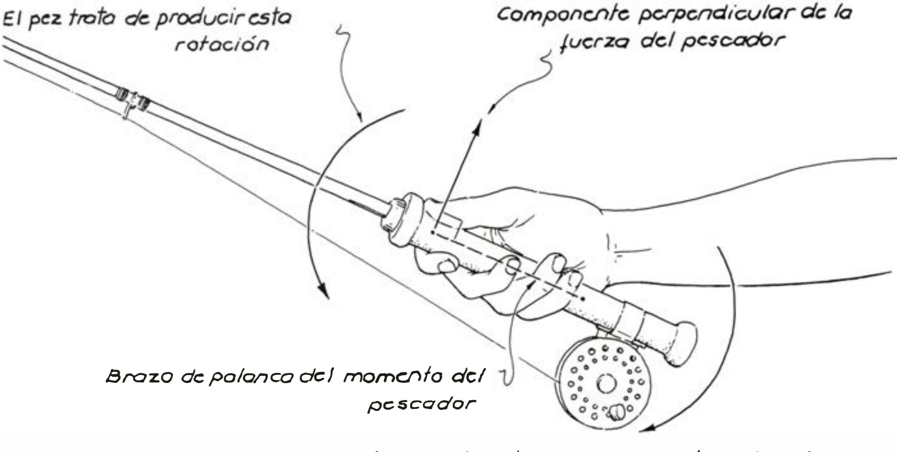


5. *Efecto de la posición de la caña sobre el momento*

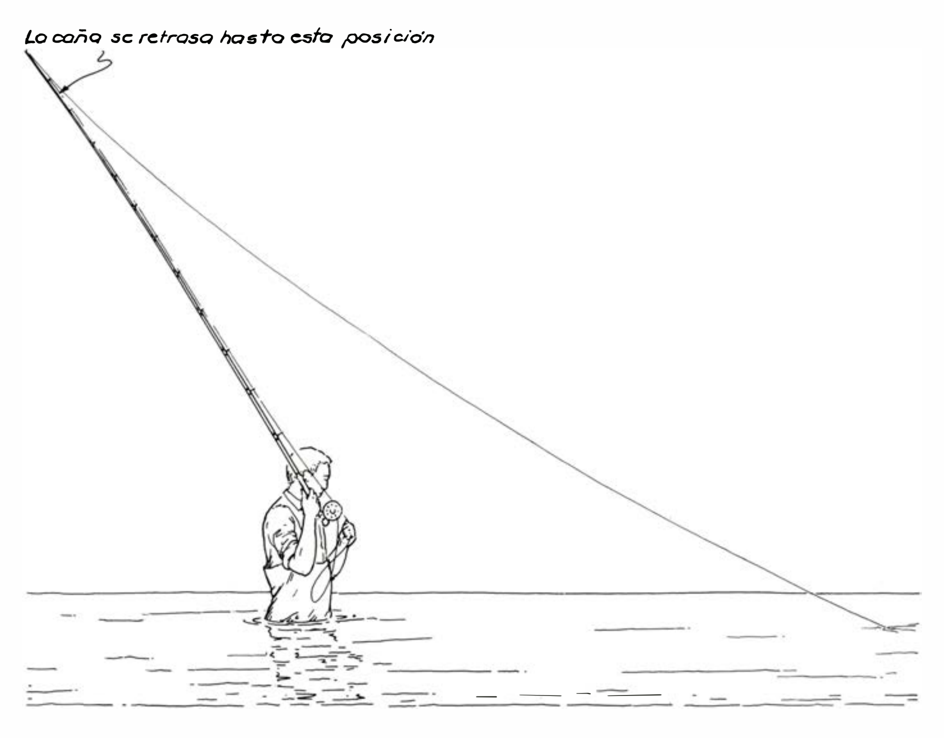
Para retener la caña el pescador debe resistir tanto el tirón como el momento de giro creados por la presa. Para contrarrestar el momento deberá generar otro momento que trate de hacer girar la caña en sentido contrario. Este momento lo produce una fuerza que se genera en su mano. Pero el brazo de palanca asociado a esta fuerza es corto, pues la mano está cerca del punto en torno al cual los momentos tienden a rotar la caña. Entonces, como el brazo de palanca es corto, el pescador deberá desarrollar una fuerza grande para que su momento iguale al del pez. En este punto la flexión de la caña cumple la función de reducir el brazo de palanca afecto al momento del pez y, por tanto, de reducir también el momento que debe aportar el pescador.

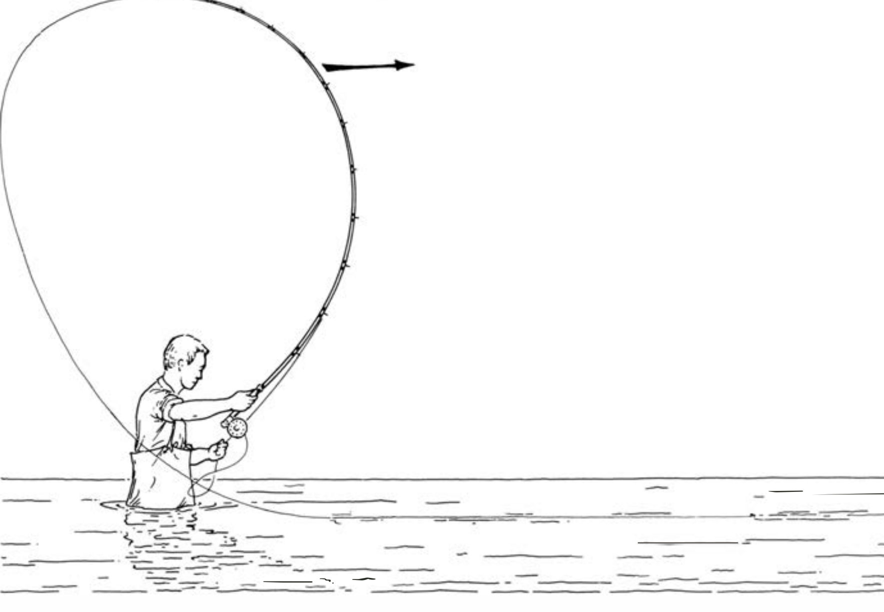
Si tiene que habérselas con un pez grande que tire con fuerza, una caña larga significará que el pez producirá un momento muy grande. Para reducirlo, el pescador empleará otra caña más corta que limite el brazo de palanca.

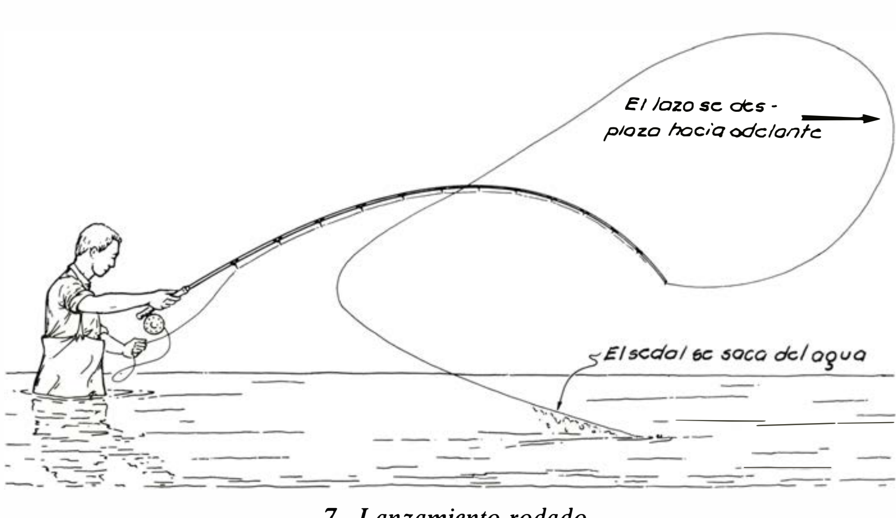
Para recoger la captura, se acostum-



6. *Momento producido por el pescador*







7. Lanzamiento rodado

bra a girar la caña hasta la vertical, al objeto de atraer el pez hacia sí. Luego, a la vez que se baja la caña, se retira sedal con el carrete. Estas operaciones las repite el pescador, acercando el pez cada vez que levanta la caña y dejándolo en el mismo sitio cada vez que la baja. Así va generando el trabajo necesario para mover el pez a través del agua.

Pero quedan muchas cuestiones pendientes relativas a la física de la pesca al lanzado. Por ejemplo, pueden estudiarse otros tipos de sedal existentes en el mercado, o bien, como Spolek, idear alguno nuevo. Puedo sugerir, asimismo, el estudio del análisis de Mosser y Buchman acerca del modo en que la flexibilidad de la caña, el llamado efecto caña, influye en el lanzamiento. Si la caña es sumamente flexible y vibra al final del lanzamiento, ¿se altera la transmisión de energía al sedal?

Un tema podría ser también el estudio de otros tipos de lanzamiento. Mosser y Buchman han analizado un lanzamiento con cebo en el cual el impulso hacia adelante de un cebo de cierto peso se aprovecha para extraer sedal del carrete. ¿Proporciona energía cinética para lanzar el cebo la flexión de la caña durante el balanceo atrás? ¿Cómo debe moverse correctamente la mano en este lanzamiento?

Me intriga, además, el lanzamiento rodado, que nadie parece haber analizado matemáticamente. Este se emplea cuando a la espalda hay obstáculos que impiden realizar el balanceo atrás que les he descrito. Tras extender cuatro o cinco metros de sedal sobre el agua, con la punta de la caña en una posición adelantada y a nivel de los ojos, se iza la caña hasta una posición casi vertical y levemente retrasada. Durante este movimiento, conforme el sedal sale parcialmente del agua, pasa junto al pescador arqueándose hacia atrás. Entonces, el pescador adelanta rápidamente la punta de la caña. Este gesto crea un lazo, o bucle completo, que se desplaza hacia la mosca, de tal modo que cuando llegue a ésta el sedal se hallará enteramente tendido por delante del pescador.

¿Cómo se mantiene el lazo al viajar por el sedal? ¿Qué se hace de la energía que el pescador comunica al sedal? ¿Cómo varía la velocidad del sedal en la parte superior del lazo cuando éste se mueve? Cuando el lazo llega a la mosca, ¿sale más sedal de la caña? ¿Qué papel desempeña en el lanzamiento la tensión superficial del agua? Mosser, Buchman, Fry, Spolek y yo recibiremos gustosos sus noticias.

Libros

Aristóteles, astronomía, edafología, óptica aplicada y minería en Plinio

A. Dou, J.L. Comellas, J. Gallardo, E. Bernabeu y L. Alonso

Física d'Aristòtil. Una Ciencia Filosófica de la Natura, por Antoni Prevosti i Monclús. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona, 1985. El autor afirma el carácter científico de una filosofía de la naturaleza. "La aspiración científica pertenece a la naturaleza misma de la filosofía, y una filosofía no científica es una contradictio in terminis" (pág. 14). Partimos, sigue el autor, de una carencia y de una necesidad de una ciencia de la naturaleza. Ciencia significa saber, que lleva a un entendimiento de la realidad, que permite al hombre situarse. Se trata de la posibilidad de construir un conocimiento de la naturaleza sobre la noción del ente natural como móvil, de modo que tengamos una ciencia cierta y consigamos una inteligencia íntegra de la naturaleza, de la que el hombre no quede separado. También se pretende una exposición sistemática y actual: de una filosofía del siglo xx y no del IV a. de C.

La introducción resulta sugerente y atractiva. Al releerla atentamente, no puedo menos de caer en la cuenta de cuánto dependen nuestras valoraciones de los puntos de vista y de las motivaciones académicas de nuestra vida ordinaria. Para mí resultan sorprendentes varios aspectos de su exposición e incluso varias de sus afirmaciones. El autor habla de la ciencia moderna en términos de decepción, pues la imagen que da del universo "resulta extraña al hombre, sin interés, o todavía peor, destructora de la propia realidad humana" (pág. 11). A la pregunta por la necesidad de una ciencia, acude inmediatamente a nuestra mente, dice el autor, la respuesta que ofrece la llamada ciencia experimental, "pero su consideración va desde el principio acompañada de perplejidad" (p. 18). En el siglo xx se han puesto de manifiesto sus insuficiencias y el hecho de que no responde a la realidad. Me confirmo en el convencimiento, no por muchas veces renovado menos sorprendente, de que la comprensión de algunas palabras clave, como ciencia, certeza, valores del saber..., resulta equívoca. Es verdad que la ciencia y la técnica están creando problemas muy serios, y que hay un énfasis sobre la vuelta a los fundamentos; pero la moderna ciencia físico-matemática es hija legítima de la ciencia y filosofía griegas; no hemos rechazado ninguno de sus problemas, seguimos discutiendo sus mismos métodos y sólo las soluciones son ahora mucho más completas y precisas. La grandeza de la física aristotélica y su importancia para una comprensión profunda de la física de todos los tiempos es indiscutible y resultará patente a todos los lectores.

El autor divide su texto de física en dos partes. La primera consta de dos capítulos, y en el primero estudia el carácter especulativo de la ciencia física. Se trata de presentar una ciencia teórica de la naturaleza. Teoría es contemplación, es el examen cuidadoso de la verdad. La superioridad de la ciencia teórica sobre la útil "proviene del hecho de que tiene su fin en sí misma, y no recibe el valor de otra cosa, sino que lo posee como propio" (pág. 36). Me parece que el autor intenta establecer una oposición o incompatibilidad entre la filosófica de la naturaleza y la ciencia experimental moderna; pero no veo que los creadores de la física experimental moderna se encierren en lo útil, sino que se abren a amplísimos horizontes y son los que contactan más profundamente con la realidad. Si esta ciencia moderna se integra en una técnica, no parece que ésta tenga que ser necesariamente manipuladora; antes bien, permite situarse y lleva a una praxis, cargada de nobles valores, en particular los de promover el bienestar de los demás.

El segundo capítulo está dedicado al concepto aristotélico de ciencia. La materia está tomada del *Organon* y en particular de los *Analíticos Posteriores.* El autor aborda primero, con erudición y profundidad, el concepto fundamental de ciencia. Después examina la debatida cuestión del esencialismo. A continuación analiza cuidadosamente los conceptos y relaciones entre inducción y experiencia; y termina con una rica y magnífica exposición del papel de la dialéctica.

En la segunda y última parte no sólo constata la estructura formal, lógica, que la *Física* aristotélica presenta; penetra en los puntos más esenciales de su contenido, en el acierto y solidez de los cuales descansa también su valor de conocimiento. Estos puntos esenciales son: la determinación del ente móvil como objeto de la filosofía de la naturaleza, el análisis hilemórfico del mismo, su comprensión como naturaleza y la definición del movimiento. Todo esto, y bastantes cosas más, se explican en seis largos y densos capítulos.

El primer capítulo consta de dos partes. Determina en la primera cuál es el sujeto (así, mejor que objeto o materia) de la física. Apelando principalmente a los capítulos VI,1 y XI,6 de la *Metafísica,* y tanto por razones intrínsecas como históricas, establece que el sujeto propio es el ente móvil. En la segunda inicia su análisis de la ciencia de la naturaleza con la afirmación de la existencia del sujeto; hay movimientos, entendidos en un sentido amplio, o sea, cambios.

El segundo capítulo se ocupa de la composición hilemórfica del ente móvil. Todo lo que se mueve está esencialmente compuesto de un sujeto, potencial, y de una forma, actual. En la séptima y última sección explica los principios del ente móvil.

Dedica los capítulos tercero y cuarto a la noción de naturaleza aristotélica, para cuya comprensión el hilemorfismo es la base teórica indispensable. Después de analizar cuidadosamente el sentido primitivo del término *physis* en el capítulo V,4 de la *Metafísica,* el autor adopta, de acuerdo con el libro II de la *Física,* la siguiente definición de naturaleza: es "un principio y causa del moverse y reposar en aquello en que se radica primeramente por sí y no por accidente" (pág. 221).

El ente natural se define por tener *en* sí mismo un principio de movimiento. El capítulo cuarto se cuestiona la naturaleza como causa. La causa es un principio. Aristóteles distingue tres clases de principios: los del ser, del acontecer o del conocer. Va detallando las cuatro causas aristotélicas, sus relaciones mutuas, la teleología, el azar y la necesidad. El evolucionismo ha llenado de confusión el tema del finalismo, y el autor hace una buena defensa de la teleología aristotélica. Pero no veo que se den razones convincentes que esclarezcan, por ejemplo, que el fin de la vi-

sión, de llegar a ver, influya o haya influido en la emergencia de los ojos a lo largo de la ontogénesis o de la filogénesis; o que este influjo no sea necesario para que haya causa final.

El quinto capítulo pone sobre el tapete el concepto de movimiento. Tras someter a exégesis la definición aristotélica del mismo ("acto de lo que es en potencia en cuanto es en potencia"), rememora las polémicas cuestiones del continuo, del infinito y de las paradojas de Zenón. El movimiento local, postrera sección de este capítulo, reviste especial interés para la historia de la física; recuérdese que, no obstante una intuición inicial falsa de Aristóteles, de su estudio deriva en gran parte la física moderna. La *física* aristotélica culmina con la teoría del primer motor inmóvil. Prevosti ha escrito un libro polémico y brillante, transido de extraordinaria seriedad, erudición y competencia; dice con exactitud lo que quiere decir sin eludir las dificultades. (A.D.)

THE GENERAL HISTORY OF ASTRONOMY. Vol. 4-A: *Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950.* Cambridge University Press, 1980, 198+14 págs. Con el tomo IV de esta historia general de la astronomía, propiciada por la Universidad de Cambridge y la Unión Astronómica Internacional, se llega a épocas relativamente recientes. La dirección general de la misma corre a cargo de Michael Hoskin. Owen Gingerich es el responsable de la edición de este cuarto volumen. Es criterio de los editores buscar una visión en escorzo que, de acuerdo con una función casi exponencial, dedica tanta más atención a los hechos cuanto más cerca de nosotros se encuentran en el tiempo. Es un criterio común a casi todas las grandes colecciones históricas, y en absoluto criticable. Por ello nada debe extrañar que este tomo se divida en dos volúmenes, prometiéndose un 4.º-B, en que se tratará de la moderna astrofísica, la estructura del universo y la sociología de la astronomía, que completará el que ahora comentamos.

Aunque del título pudiera deducirse que el volumen abarca la primera mitad del siglo actual, la verdad es que comprende una centuria completa, desde mediados de la pasada hasta mediados de la presente, O. Gingerich, en un comprensivo aunque breve prólogo, trata de justificar estas fechas. La de 1850, por las innovaciones que entonces tuvieron lugar, tanto en el aspecto instrumental (plateado de espejos por Foucault, nuevas placas para la fotografía estelar por G.P. Bond) como en el del nacimiento de la astrofísica propiamente dicha, gracias al avance que al análisis espectral imprimieron G.R. Kirchoff y R.W. Bunsen. La elección de 1950 como fecha final le parece al editor un poco más discutible, aunque la verdad es que a muchos lectores les parecerá suficientemente justificada por los primeros ensayos útiles de la radioastronomía; la apertura de nuevas "ventanas" al espectro observacional, que son la clave de la astrofísica contemporánea; el descubrimiento del concepto de "población estelar", sin el cual no hubiera sido posible el conocimiento de la evolución de las estrellas y la estructura galáctica; la comprensión de la expansión del universo y la aplicación de la electrónica a la astronomía.

La parte I del libro se dedica al *nacimiento de la astrofísica y otros procesos a fines del siglo* XIX *(1850-1920):* una vez más, como se aprecia ya desde el título, y más aun por lo que se refiere al contenido, existe una cierta incongruencia entre el enunciado y el ámbito cronológico que se abarca. La causa está en que hay procesos que no pueden cortarse bruscamente en 1900.

A.J. Meadows, de la Universidad de Leicester, habla en un primer capítulo de *los orígenes de la astrofísica.* Señala la inflexión que experimenta la ciencia astronómica hacia 1850-60, cuando se pasa del interés primordial acerca de *dónde están los astros y cómo se mueven,* hacia el referente a *qué son* y *cuál es su naturaleza.* La espectroscopía, perfeccionada sucesivamente por Schwabe, Secchi y Ängstrom, permitió conocer la composición del sol, y enseguida la de otras estrellas. ¿Por qué se detecta hidrógeno en Aldebarán y no en Betelgeuse? La diferencia de composición de las distintas estrellas sugiere la idea de una evolución estelar, sugerencia a la que no parece ser ajeno el evolucionismo biológico entonces en boga. Quedaban colocados los primeros cimientos de la ciencia astrofísica.

John Lanford, de la Universidad de Missouri, se refiere en un segundo capítulo al *impacto de la fotografía en la astronomía.* En este caso hay que comenzar un poco antes de 1850, con la obra de J. Draper, que en 1840 obtuvo el primer daguerrotipo de la luna, para en los años sucesivos perfeccionar su tarea, como hicieron también G.A. Majecchi, Foucault, De la Rue, Fizeau y Henry Draper. Se aprendió a fotografiar el sol, y ya por los años 60 el cielo estrellado y las nebulosas. En la segunda mitad del siglo XIX la fotografía fue sustituyendo al ojo humano en su tarea de captar la imagen del cosmos: es objetiva, es conservable y suma luz con el tiempo. Por los años 70 se imponen las placas secas, que facilitan el procesado.

La fotografía permitió, a fines del siglo XIX, dos grandes avances: uno de ellos, su aplicación al análisis espectral, con una eficacia que está vedada al simple ojo humano, e hizo posibles los grandes catálogos espectrales; y otro, una mayor posibilidad en el campo de la astrometría, que sugirió ya por los años 80 y 90 la gran *Carte du Ciel,* tarea repartida entre los grandes observatorios de los dos hemisferios, y que por una serie de motivos —aparte de su inmenso volumen de trabajo— no pudo publicarse completa hasta 1964. Fue el éxito de la fotografía el que propició la construcción de grandes telescopios reflectores (Meudon, Yerkes, Mt. Wilson) en detrimento de los refractores, más propensos a la dispersión cromática. La fotografía hizo posibles los primeros intentos de fotometría.

El progreso en el conocimiento de los cuerpos celestes hizo necesaria la construcción de telescopios cada vez mayores y más perfeccionados. Albert van Helden, de la Rice University de Houston (Texas), hace un útil repaso de *la construcción de telescopios, 1850-1900,* que viene a complementar una de las últimas ideas del capítulo anterior. El medio siglo en cuestión representa "la edad de oro del refractor" y el comienzo de la metalización de los reflectores, con su consiguiente posterior predominio. En 1850, los mayores refractores del mundo eran de 38 cm de abertura (Pulkowo y Harvard), y el mayor reflector el gigantesco pero poco manejable "Leviathan" de lord Rosse, con sus 182 cm. Grandes constructores, como Grubb, Gautier, Lassell, Clark, Zeiss —que a principios de siglo inaugura una nueva era— se encargaron de superar estas marcas, tanto en dimensiones como en calidad. Para hacerse cargo del progreso cuantitativo del equipamiento telescópico puede ser más útil que este capítulo (un tanto desordenado, tal vez) el apéndice *The world's largest telescopes,* realizado con excelente información por Bárbara L. Welther.

En principio, el capítulo más interesante parece ser el de A.J. Meadows, *The new astronomy*, recogiendo el título de un popular libro de S.P. Langley, publicado en 1888. Efectivamente, por entonces cundía ya la convicción de que la ciencia astronómica había alcanzado nuevos y sensacionales campos de investigación. Concretamente, nacía la astrofísica: la mención de este término fue hecha por primera vez por Hale, "Astro-Physics", en 1891. Realmente, el camino había comenzado a recorrer-

se bastante antes, y fueron sus pioneros Kirchoff y Bunsen, un físico y un químico, como en simbólica significación de un hermanamiento que daría lugar a la astrofísica y a la fisicoquímica.

En el último tercio del siglo XIX, precisa Meadows, existía ya un equipamiento, y hasta una preparación científica de base, suficientes para imprimir a la astrofísica un avance decisivo. El campo fundamental del avance, en ese último tercio, fue la espectroscopía, donde Ängstrom puso las bases del cálculo preciso de las longitudes de onda, y Rutherford las llevó a la perfección. Con ello, se llegó a un conocimiento perfecto de la composición química del sol: pero nadie, en 1900, podía explicar qué es el sol.

Helen Sawyer Hogg se extiende a continuación sobre el tema de las *estrellas variables,* uno de los campos más fecundos para el progreso de la ciencia astrofísica. Hasta 1850, se conocían unas cuantas docenas de estrellas de este tipo, que Argelander catalogó por letras de la R a la Z dentro de cada constelación. Argelander (1799-1875), autor de un notable aunque muy simple método de medida de magnitudes diferenciales, fue el último de los grandes observadores ópticos, y a la vez el primer gran descubridor fotográfico. Hasta entonces, las estrellas variables habían sido descubiertas unas veces por azar, otras después de laboriosas búsquedas y comparaciones. La fotografía permitió unas posibilidades insospechadas. Tanto fue así, que en 1881 hubo que sustituir el sistema de catalogación de Argelander —que comprendía un máximo de 9 estrellas por constelación— por el que iba de RR, RS... hasta ZZ... el cual se quedó corto mucho antes de promediar el siglo XX.

Pero lo importante de la aportación de los variabilistas no fue el descubrimiento de nuevos ejemplares, sino la determinación de tipos. En 1911 se aceptó la clasificación de Pickering, base de la actual; pero ya se conocía bastante bien el comportamiento de las cefeidas en 1908, cuando miss Leavitt hizo su sensacional descubrimiento de la relación período-magnitud absoluta, en las variables de las Nubes de Magallanes. Sin este hallazgo, se hubiera tardado mucho más tiempo en conocer las grandes distancias intergalácticas, y no digamos ya las extragalácticas.

Pero fue muy importante también lo que comenzó a aportar el conocimiento de las *novas.* La época de cambio de siglo fue decisiva en este aspecto, y la *nova Persei,* en 1901, la primera en estudiarse en profundidad: por primera vez pudo detectarse fotográficamente nebulosidad en torno a la estrella en explosión. Pero la fotografía comenzó a descubrir el estallido de novas (en realidad supernovas) en otras galaxias. Los estudios de Shapley dejaron en claro que tenían que existir dos tipos de novas. Y en 1931, el descubrimiento por Hubble de cefeidas en M 31 abrió un campo insospechado en la determinación de distancias en el universo: las galaxias eran, definitivamente, los *universos-islas* intuidos por Kant, y su distancia del orden de varios o muchos millones de años-luz.

Si el estudio de Hogg es interesante, lo es aún más el de David Devorkin sobre *evolución estelar y el origen del diagrama Hertzsprung-Russell.* Es lógico que el interés astronómico de los analistas espectrales se centrase primeramente en el sol. La composición química del astro del día se conoció mucho antes que el origen de su fabulosa energía, y durante mucho tiempo estuvieron en pugna la teoría meteorítica de Thomson y la termodinámica de Helmholtz. Cuando ésta prevaleció sobre la primera, nuevas contradicciones fueron socavándola. El secreto del sol —y el de las demás estrellas— no comenzaría a quedar desvelado hasta los años 30. Pero a su vez la elección del sol como modelo de estrella comenzó a hacerse progresivamente más problemática, no porque nuestro astro central fuese una excepción, sino porque hay muchos tipos de estrellas distintos. Pickering comenzó la clasificación espectral alfabética, base de la utilizada hoy; y poco a poco se relacionó cada tipo espectral con un estadio distinto de la evolución estelar. Pero ¿en qué sentido se operaba esta evolución? Tal pregunta supuso uno de los campos de lucha más empeñados en la época de cambio de siglo y primer tercio del XX. Por un tiempo coexistieron dos teorías incompatibles: la que suponía que las estrellas nacen azules y mueren rojas, y la consecuente con el "arco de Lockyer", según la cual las estrellas nacerían rojas, pasarían por un máximo de actividad energética (azules) y morirían rojas de nuevo.

Pero el progresivo conocimiento de las distancias estelares mediante el cálculo de la paralaje o el movimiento propio aparente condujo a las más inesperadas sorpresas: muchas de las estrellas rojas aparecían ser, de acuerdo con lo esperado, soles enanos y próximos a nosotros, mientras las azules, gigantes y muy luminosas, se encontraban a distancias casi incalculables. Pero algunas de las más brillantes entre las rojas se comportaban como las azules. ¿Qué explicación cabía dar a semejante anomalía? Ya Monck aventuró en 1894 que podían existir dos tipos de estrellas amarillo-rojizas: las enanas y próximas, tipo Alfa Centauri, y las gigantes lejanas, tipo Capella.

Las medidas de Kapteyn permitieron generalizar esta idea, y a principios del siglo XX el astrofísico danés E. Hertzsprung concibió que la secuencia del espectro se dividía en dos ramas, en cuyos extremos se encontrarían las gigantes rojas y las enanas rojas. Henry Norris Russell, el 1909, trazó por primera vez el diagrama. Aun no se conocía, ni con mucho, cómo nacen, evolucionan y mueren las estrellas: pero se había dado el paso decisivo para ese conocimiento.

La segunda parte del libro se dedica a *observatorios e instrumental.* Albert van Helden escribe de nuevo sobre la construcción de los grandes telescopios entre 1900 y 1950, llegando hasta el hoy segundo del mundo, el de Mt. Palomar, con sus 200 pulgadas (5 m.) de diámetro, inaugurado en 1948. David S. Evans se refiere a *las instituciones astronómicas en el hemisferio S.* Charles Fehrenbach habla del *instrumental del siglo XX,* refiriéndose esencialmente al refinamiento de los métodos espectrales, la introducción de la cámara Schmidt, la fotometría fotoeléctrica, la bolometría, polarimetría, coronografía e interferometría. Finalmente, W.T. Sullivan intenta introducirse en un campo con muy poco desarrollo antes de 1950, como es *la primera radioastronomía.* No es de extrañar que la casi totalidad de su análisis se concentre entre los años 1946 y 1950. No cabe duda de que estos aspectos hubieran podido ser relegados al tomo siguiente; pero no deja de ofrecer interés el descubrimiento por el ingeniero Jansky, en 1932, de las primeras emisiones radio de origen extraterrestre, estudiadas desde un punto de vista astronómico por G. Reber, y el descubrimiento progresivo de la radiación solar. La primera detección de radiofuentes de origen estelar o extraestelar (Cas. A, Vir. A, Cen. A, etc.) entre 1948 y 1950 es sin duda el arranque de un proceso que pertenece a la segunda mitad de nuestro siglo.

El tomo, en general, tiene todas las virtudes y defectos de una obra colectiva (no se trata en absoluto de una obra en equipo). Cada tema está tratado por un especialista en la materia, y la información es en casi todos los casos perfecta. Es difícilmente evitable que existan solapamientos y lagunas. Hay temas, como los referentes a la construcción de telescopios o los avances en la espectroscopía, en que una determinada información se reitera por tres

veces en la pluma de distintos autores. Otros —pongamos por caso, el estudio de dinámica de binarias y la función masa-luminosidad— no se tocan en ningún capítulo de la obra, y se echan de menos. Quizá una dirección más a fondo del "editor" hubiera evitado esta desigualdad de tratamiento. (J.L.C.)

EDAFOLOGÍA, por Ph. Duchaufour. Masson; Barcelona, 1983. La obra es una refundición y puesta al día de una serie de textos que Duchaufour ha ido elaborando desde los años sesenta; uno de ellos, *Precis de Pédologie* (1970), se tradujo también al castellano en 1975, con notable retraso, plagado de erratas y a destiempo, pues el autor contemplaba nuevas ideas en su posterior *Processus de Formation des Sols: Biochimie et geochimie* (1972). El acierto de la aparición de la edición española de *Pédologie* ha sido doble; sustituía al malogrado *Manual de Edafología* y, segundo, se atiene a la última edición del libro.

La obra consta de dos partes bien diferenciadas. En la primera se exponen ideas que en gran parte ya se contenían en el citado *Processus de Formation des Sols,* relativas a la evolución de la fracción mineral y la dinámica de la materia orgánica; los puntos de vista recogidos se refieren en gran parte a las experiencias realizadas en el Centre de Pédologie Biologique de Nancy, en la Universidad de Estrasburgo y el I.N.R.A. de Versalles, esto es, la propia experiencia francesa. También se extiende en el transporte de materiales del suelo, ya descendentes, ya ascendentes, incluidos los ciclos biogeoquímicos de los elementos, a los que la escuela de Nancy concede bastante importancia. Termina con los principios generales a considerar en la génesis y evolución de los suelos, abundando en la idea de los llamados por el autor "ciclos cortos", que son aquellos que dan lugar a suelos distintos regulados fundamentalmente por el factor *materia orgánica* (zonas frías y templadas), y "ciclos largos", aquellos donde la edad y el régimen hídrico regulan la *alteración de los minerales,* originándose distintos suelos (zonas tropicales y ecuatoriales). Lógicamente existen casos intermedios, incluso suelos que han sufrido diversos ciclos. Y se pasa revista a los factores ecológicos (consecuencia de la influencia de la escuela rusa sobre la de Nancy), sin olvidar la bibliografía alemana en la consideración de los suelos centroeuropeos.

La segunda parte se abre con una revisión didáctica de las diferentes clasificaciones de suelos más utilizadas en el mundo occidental. Se intenta justificar un sistema de clasificación basado en los procesos edafogenéticos, clasificación que el autor desarrolla, y es más o menos aceptada en el mundo francófono, incluso en España.

La clasificación "francesa" que propone Duchaufour se ramifica en tres grandes divisiones: suelos grandemente influenciados por la materia orgánica, luego de ciclo corto (división I); suelos sin influjo de la materia orgánica, luego de ciclo largo (división II), y suelos influenciados por las condiciones locales, luego intrazonales (división III). Sin embargo, estas divisiones no contemplan las clases al modo que tan afortunadamente lo hiciera Kubiena. Se detallan luego doce clases, según el grado de diferenciación y evolución del perfil del suelo: clase I, suelos poco evolucionados; clase II, suelos poco diferenciados en horizontes y desaturados; clase III, suelos calcimagnésicos, saturados; clase IV, suelos isohúmicos; clase V, suelos vérticos; clase VI, suelos empardecidos; clase VII, suelos podsolizados; clase VIII, suelos fersialíticos; clase IX, suelos ferruginosos; clase X, suelos ferralíticos; clase XI, suelos hidromorfos y clase XII, suelos salsódicos. Cada clase comprende varias subclases, que se distinguen entre sí por variantes en el proceso genético básico en virtud de la aparición de un proceso subsidiario. A su vez, en cada subclase se pueden considerar grupos, según el grado de diferenciación o evolución de los perfiles, por intergradación en otro proceso, por aparición de otros horizontes no esenciales o por modificaciones antropozoógenas. Dentro de los grupos caben subgrupos.

Abordará cada una de las diferentes clases y subclases de los suelos, en exposición muy didáctica y utilizando esquemas de perfiles de suelos muy ilustrativos, de amplio uso ya entre los docentes de la ciencia del suelo. A nuestro entender, las clases IX y X podrían refundirse, como luego se hace en la exposición, pues si critica la utilización de números para definir los grandes grupos de suelos en la clasificación americana, no puede darse luego el límite de 16 m/100 g para separar las clases, aun cuando sí se considere el grado de intensidad de procesos. (Son los suelos subtropicales y tropicales los menos conocidos, y es de esperar que las clasificaciones varían en un futuro en estos aspectos.)

La obra contempla, sobre todo, suelos de Centroeuropa, Rusia y ciertos países americanos con intercambios franceses (Canadá, Colombia, Estados Unidos), reduciéndose el espectro ibérico a los ránkeres gallegos o los suelos rojos mediterráneos. De este mismo defecto se resiente su complementario *Atlas ecológico de los suelos del mundo.* Pensamos, pues, que sigue siendo necesaria una obra sobre edafología ibérica (J.G.L.)

OPTICS AND LASER, por Matt Young. Springer-Verlag; Berlín, 1984. Corresponde a una segunda edición revisada de la obra de igual título, publicada por la misma editorial en 1977 en la prestigiosa colección "Springer Series in Optical Sciences" que cuenta hoy con más de 40 volúmenes dedicados a diferentes temas de óptica, en su mayor parte monográficos. La obra de M. Young consta de once capítulos, de los que tres, sobre comunicaciones ópticas y óptica integrada, son nuevos en esta segunda edición.

La estructura general sigue el esquema habitual de los tratados clásicos, adaptándose bien al contenido mínimo de un curso de óptica universitario de nivel medio. La orientación dada por M. Young se decanta por las aplicaciones industriales y tecnológicas, sacrificando aspectos básicos. Estos últimos se ofrecen de manera esquemática, lo que, quizá, para los no iniciados presente dificultades, que pueden paliarse con las referencias bibliográficas generales a que el autor remite en cada uno de los capítulos.

El primero de éstos es una breve revisión de la óptica geométrica, catapulta para el siguiente: los instrumentos ópticos fundamentales, ojo, cámara fotográfica, telescopio, microscopio y sistemas de iluminación. Bajo el título de fuentes de luz, expone en el tercero las nociones fundamentales de radiometría y fotometría con una breve descripción de técnicas y de componentes emisores y detectores de luz. El capítulo cuarto está dedicado a óptica ondulatoria, y nos introduce en el marco general de la teoría electromagnética. Los dos capítulos siguientes, el quinto y sexto, nos traen las aplicaciones más importantes de la interferometría y la difracción, en admirable síntesis. Se nos introduce luego en la física del láser, sus tipos y regímenes de funcionamiento.

El capítulo octavo, sobre efectos electromagnéticos y de polarización, describe los cambios de medio, componentes de producción y análisis de luz polarizada, óptica no lineal y efectos electroópticos, magnetoópticos y aceestoópticos. Los tres últimos capítulos, nueve, diez y once, son los más atractivos y actuales de esta obra. Se aclaran las nuevas nociones de ondas guiadas y distintos aspectos de la tecno-

logía de fibras ópticas y óptica integrada. En resumen, la de M. Young es una obra ágil que, sin caer en lo prolijo, da muchos detalles de interés para los usuarios de la óptica en su vertiente aplicada y tecnológica. (E.B.)

PLINE L'ANCIEN: HISTOIRE NATURELLE XXXIII; texte établi, traduit et commenté par Hubert Zehnacker; Paris, Société d'édition "Les Belles Lettres", 1983. C. PLINIUS SECUNDUS d. Å.: NATURKUNDE. Lateinisch-Deutsch; Buch XXXIII. Herausgegeben und übersetzt von Roderich König in Zusammenarbeit mit Gerhard Winkler. Artemis Verlag, München und Zürich, 1984. Con una diferencia de un año acaba de salir a la luz, en dos importantes colecciones europeas, el tomo XXXIII de la *Historia natural* de Plinio, el primero de los dedicados a la metalurgia. Se ocupa en este volumen trigésimo tercero del oro y la plata; luego irán sucediéndose sendos libros relativos al bronce, los colores, las piedras nobles y las piedras preciosas.

Plinio el Viejo (c. 23— c. 79 d.C.) es, sin lugar a dudas, uno de los autores más denostados y peor conocidos. Si algo saben nuestros naturalistas del insigne mártir de la solidaridad en las erupciones vesubianas que arrasaron Pompeya es que escribió una ingente enciclopedia donde dice muchas necedades. ¿Quién no ha oído semejante dislate? Y con ese juicio condenatorio han retraído a muchísimos de la lectura del autor más citado por toda la tradición naturalista: botánica, zoológica y mineralógica. Cierto es que muchas veces no se muestra demasiado exigente con las fuentes que compila y con el testimonio de sus informadores. Pero tampoco es tan ligero como para no matizar las opiniones con un cauto *aiunt* (dicen), *dicitur* (se cuenta), *traditur* (se viene sosteniendo), cuando de relatos mágicos o poco verosímiles se trata. Si el comunicante no tiene mayor formación se apresta a avisar el lector: lo escribe por testimonio de *imperiti* (no versados).

Este libro XXXIII guarda especial interés para la mineralogía española. En *Investigación y Ciencia* se trató recientemente de la explotación de las minas de oro del septentrión nacional. La fuente más sólida eran justamente estas páginas: "Cetero montes Hispaniarum, aridi sterilesque et in quibus nihil aliud gignatur, huic bono fertiles esse coguntur" (67), "Por lo demás, las montañas de Hispania, áridas, estériles e incapaces de rendir cualquier otro producto, se ven forzadas a aportar en abundancia ese bien precioso". No sólo ese texto aislado. *Asturia* (78), *Baetica* (118), *Hispania* (54, 62, 66, 67, 76, 89, 96, 114, 118, 145, 158), *Tagus* (66) son referencias puntuales de un libro que compendia la minería, la historia y el comercio de nuestra primera centuria.

Plinio tiene referencias directas de nuestra zoología y botánica. Un botón de muestra, a propósito de una planta que no recoge Teofrasto y que por consiguiente es él nuestra fuente primera: "Vettones in Hispania eam quae vettonica dicitur in Gallia, in Italia autem serratula, a Graecis cestros aut psychrotrophon" (XXV,84). Se refiere presumiblemente a la *Stachy officinalis,* de hojas fuertemente festoneadas, flores de color rojo-púrpura en densas espigas.

La edición de la "Budé" mantiene el nivel de dignidad característico de la colección. Tras una introducción sobre las fuentes del texto, se aporta la traducción y el texgo crítico con las apostillas a pie de página de los manuscritos colacionados y deja el extenso comentario para el final, donde se maneja sin alarde un buen conocimiento de las posibles reacciones químicas empleadas en las aleaciones, los métodos de extracción, las disquisiciones léxicas, el contexto histórico y político, así como los errores cometidos por Plinio y sus aciertos.

La edición "Tusculum", la alemana, rompe un tanto los criterios tradicionales en esta suerte de bibliografía. Winkler se ocupa de establecer el texto y König de su versión vernácula. Comparten los comentarios (léxicos, químicos y cristalográficos e históricos), Winkler aporta tablas paralelas de las distintas ediciones más fiables (Detlefsen, Mayhoff, Bailey, Rackham/Warmington, Zehnacker y la propia de Tusculum), y alternan o firman conjuntamente otros apéndices: bibliografía, índices, etcétera. Entre las obras reseñadas figura obviamente el capítulo escrito por Zehnacker sobre las minas de oro en España en la edición reseñada.

Siempre que *Investigación y Ciencia* comenta la edición crítica de alguna obra suele terminar con una amarga constatación: salvo el esfuerzo de la Bernat Metge y algún ejemplo esporádico más, nuestro país no cuenta con colecciones de este tipo. Si alguna editorial acomete algún tímido esfuerzo es sacrificando el texto original, con lo que se pierde buena parte del valor. ¿Habrá que recordar a nuestros políticos que investigación de punta es ésta también? Tan nuestro es el libro XXXIII de la *Historia natural* de Plinio el Viejo como la obra botánica de Francisco Hernández. (L.A.).

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DEPOSITOS CRIOGENICOS DE HORMIGON PRETENSADO

Concrete and Cryogenics. F. H. Turner. Cement and Concrete Association, 1979.

Prestressed Concrete for the Storage of Liquefied Gases. A. S. G. Bruggeling. Cement and Concrete Association, 1981.

Cryogenic Behaviour of Materials for Prestressed Concrete. M. Elices, F. S. Rostasy, W. M. Faas y G. Wiedemann. FIP, Wexham Springs; Slough, 1982.

LOS SATELITES DE URANO, NEPTUNO Y PLUTON

Out of the Darkness: The Planet Pluto. Clyde W. Tombaugh y Patrick Moore. Stackpole Books; Harrisburg, Pennsylvania, 1980.

The Outer Solar System. David Morrison y Dale P. Cruikshank en *The New Solar System,* dirigido por J. Kelly Beatty, Brian O'Leary y Andrew Chaiken. Cambridge University Press y Sky Publishing Corporation, 1983.

Physical Properties of the Uranian Satellites. R. H. Brown en *Uranus and Neptune.* NASA Conference Publication No. 2330; 1984.

El Nuevo Sistema Solar. Varios. Libros de *Investigación y Ciencia.* Prensa Científica, S. A., Barcelona, 1985.

Outer Planet Satellites. D. P. Cruikshank y R. H. Brown en *Natural Satellites,* dirigido por J. A. Burns y D. Morrison. University of Arizona Press. En prensa.

LIMITACIONES FISICAS FUNDAMENTALES DE LOS PROCESOS DE COMPUTO

Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process. R. Landauer en *IBM Journal of Research and Development,* vol. 5, n.º 3, páginas 183-191; julio, 1961.

Conservative Logic. Edward Fredkin y Tommaso Toffoli en *International Journal of Theoretical Physics,* vol. 21, n.os 3/4, págs. 219-253; abril, 1982.

The Thermodynamics of Computation —a Review. Charles H. Bennett en *International Journal of Theoretical Physics,* vol. 21, n.º 12, págs. 905-940; diciembre, 1982.

Fundamental Physical Limitations of the Computational Process. Rolf Landauer en *Annals of the New York Academy of Sciences,* vol. 426, págs. 161-170; 1985.

LA EVOLUCION DEL DARWINISMO

Is a New Evolutionary Synthesis Necessary? G. Ledyard Stebbins y Francisco J. Ayala en *Science,* vol. 213, n.º 4511, págs. 967-971; 28 de agosto de 1981.

Perspectives in Evolution. Dirigido por Roger Milkman. Sinauer Associates, Inc., 1982.

Evolution of Genes and Proteins. Dirigido por Masatoshi Nei y Richard K. Koehn. Sinauer Associates, Inc., 1983.

Evolution: An Integrating Principle for the Modern Synthesis. G. L. Stebbins en *Experientia,* vol. 39, n.º 8, págs. 823-824; 15 de agosto de 1983.

RECONOCIMIENTO QUIMIOSENSORIAL DE LA INDIVIDUALIDAD GENETICA

Control of Mating Preferences in Mice by Genes in the Major Histocompatibility Complex. K. Yamazaki, E. A. Boyse, V. Mike, H. T. Thaler, B. J. Mathieson, J. Abbott, J. Boyse, Z. A. Zayas y L. Thomas en *The Journal of Experimental Medicine,* vol. 144, n.º 5, págs. 1324-1335; 1 de noviembre de 1976.

Distinctive Urinary Odors Governed by the Major Histocompatibility Locus of the Mouse. M. Yamaguchi, K. Yamazaki, G.K. Beauchamp, J. Bard, L. Thomas y E. A. Boyse en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 78, n.º 9, págs. 5817-5820; septiembre, 1981.

The Sensory Perception of Genotypic Polymorphism of the Major Histocompatibility Complex and Other Genes: Some Physiological and Phylogenetic Implications. Edward A. Boyse, Gary K. Beauchamp y Kunio Yamazaki en *Human Immunology*, volumen 6, páginas 177-183; 1983.

Sensory Distinction between $H\text{-}2^b$ and $H\text{-}2^{bm1}$ Mutant Mice. K. Yamazaki, G.K. Beauchamp, I.K. Egorov, J. Bard, L. Thomas y E. A. Boyse en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 80, n.º 18, págs. 5685-5688; septiembre, 1983.

LOS PALACIOS MINOICOS

The Palaces of Crete. James W. Graham. Princeton University Press, 1969.

Zakros: The Discovery of a Lost Palace of Ancient Crete. Nicholas Platon. Charles Scribner's Sons, 1971.

The Aegean Civilizations. Peter Warren. Elsevier-Phaidon, 1975.

Palaces of Minoan Crete. Gerald Cadogan. Methuen, Inc., 1980.

AGUA FOSIL BAJO LA PENINSULA SINAI-NEGEV

On the Ancient Water of the Upper Nubian Sandstone Aquifer in Central Sinai and Southern Israel. A. Issar, A. Bein y A. Michaeli en *Journal of Hydrology,* vol. 17, n.º 4, págs. 353-374; diciembre, 1972.

Desert Isotope Hydrology: Water Resources of the Sinai Desert. Joel R. Gat y Arie Issar en *Geochimica et Cosmochimica Acta,* vol. 38, págs. 1117-1131; julio 1974.

Chemical Composition of Rainwater and Floodwaters in the Negev Desert, Israel. R. Nativ, A. Issar y J. Rutledge en *Journal of Hydrology,* vol. 62, n.os 1/4, págs. 201-223; abril, 1983.

LAS ASCLEPIAS Y SUS VISITANTES

The North American Species of *Asclepias.* Robert E. Woodson, Jr., en *Annals of the Missouri Botanical Garden,* vol. 41, n.º 1, págs. 1-211; febrero, 1954.

Contributions of Diurnal and Nocturnal Insects to the Pollination of Common Milkweed (*Asclepias syriaca* L.) in a Pollen-limited System. Douglass H. Morse y Robert S. Fritz en *Oecologia,* vol. 60, n.º 2, págs. 190-197; 1983.

The Partitioning of Pollinators among Three Species of *Asclepias.* Susan R. Kephart en *Ecology,* vol. 64, n.º 61, págs. 120-133; febrero, 1983.

TALLER Y LABORATORIO

On the Dynamics of a Bull Whip. B. Bernstein, D.A. Hall y H.M. Trent en *The Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 30, n.º 12, págs. 1112-1115; diciembre, 1958.

The Dynamics of a Flycast. Ed. Mosser y William W. Buchman, en *The Flyfisher,* vol. 13, n.º 4, págs. 5-9; 1980.